

原子爐의 非線型制御에 關한 研究

(Study of nonlinear Control System for the Argonne Advanced Research Reactor)

高 丙 俊*
(Koh, Byung Joon)

要 約

Argonne Advanced Research Reactor의 動特性을 가지고 原子爐의 過渡의 應答에 對한 問題를 非線型인 Relay와 gear를 重點으로 하고 Analog Computer를 利用하여 自動制御上의 安全度를 檢討하였다.

ABSTRACT

The Reactor transient and steady state Response Problem is not always satisfied in automatic control to insure safe operation, because all physical systems are nonlinear to some region such as the deadzone of relay and the backlash of gear. The study for nonlinear control system is described by the applying of analog computer with the parameters given by the argonne advanced Research Reactor.

序 論

原子爐의 Transient 및 Steady State 應答問題는 制御系 自體가 gear와 같은 非線型物理的 特性으로 構成되어 있기때문에 恒常 自動制御安全運轉에 滿足을 주지 못하고 있다. 이것은 특히 高速 或은 高出力 原子爐에 있어서 必要한 出力을 내기 爲해 制御棒을 움직일 때 制御棒과 모우터間에 連結된 gear의 非線型的 backlash特性 때문에 出力에 주는 應答의 差度가 크게 생기는데 原因이 있는 것이다. 그러므로 여기서는 이 問題를 考慮하여 充分히 큰 出力變位를 주기 爲하여 10%에서 100%로 制御棒을 變動하고 그리고 過渡의 應答을 빨리 얻는 安全制御를 爲한 Relay의 on-off인 非線型動作을 利用하여 모우터를 움직이게 하였다. 이 때 線型的 制御方式에서 印加할 수 없는 큰 入力を 주므로서 나타나

는 出力의 fluctuation이 0.5%의 적은 값과 Steady State되는 時間이 40sec程度의 적은 값을 얻는 有利한 事項을 考察하여 보았다.

本 論

一般的으로 原子爐의 自動制御는 그림 1과 같이 原子爐自體의 非線型 特性에다 Relay의 非線型 모우터의 線型 그리고 gear의 backlash의 非線型等으로 複雜한 組織體로 되어 있기때문에 理論적으로 解析하기가 매우 어렵다. 故로 이 解를 爲하여 直接 Analog Computer를 利用하여 解를 求해 보았다.

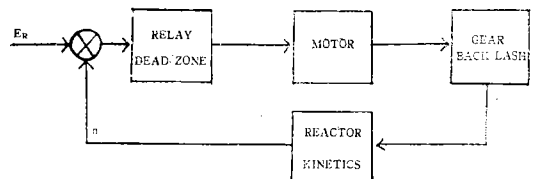


그림 1 制御系統圖

* 原子力研究所
Electronics Div, Atomic Energy Research Institute
(1967. 7. 20接受)

1. 原子爐의 動特性 方程式

零出力 原子爐 特性 方程式은

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta_k - \beta}{\ell^*} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i \quad (1)$$

과

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell^*} n - \lambda_i c_i \quad (2)$$

로 表示할 수 있으며 電子計算器에 便利하도록 變更하면 (3) 및 (4) 式과 같이 된다.

$$\text{즉 } \frac{\ell^*}{\beta} \frac{dn}{dt} = \frac{\delta_k}{\beta} n - n + \sum_{i=1}^6 \frac{\ell^*}{\beta} \lambda_i c_i \quad (3)$$

그리고

$$\frac{\ell^*}{\beta} \frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\beta} n - \frac{\ell^*}{\beta} \lambda_i c_i \quad (4)$$

이 때 β_i 와 λ_i 의 값은

$\beta_1 = 2,547 \times 10^{-4}$	$\lambda_1 = 1.244 \times 10^{-2}$
$\beta_2 = 1,698 \times 10^{-3}$	$\lambda_2 = 3,051 \times 10^{-2}$
$\beta_3 = 1,519 \times 10^{-3}$	$\lambda_3 = 1,114 \times 10^{-1}$
$\beta_4 = 3,072 \times 10^{-3}$	$\lambda_4 = 3.014 \times 10^{-1}$
$\beta_5 = 8,936 \times 10^{-4}$	$\lambda_5 = 1,136$
$\beta_6 = 3,239 \times 10^{-5}$	$\lambda_6 = 3,014$

이다. 그리고 ℓ^* 은 1.6×10^{-5} sec이고 β 全體의 값은 77.61×10^{-6} 이다.

n_1 Power level or neutron level

δ_k Change in total reactivity seen by reactor

β_i Effective delayed neutron fraction

β Total effective delayed neutron fraction

ℓ^* Prompt neutron life time

λ decay constants of group i

C_i Concentration of the delayed neutrons emitted of group i .

2. 熱傳達 方程式

原子爐의 出力과 Reactivity 그리고 燃料棒에 서 發生되는 熱傳達의 平衡方程式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{즉 } \frac{dT_m}{dt} = \frac{Q}{C_m} - \frac{h_{mw}}{C_m} (T_m - T_w) \quad (5)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{h_{mw}}{C_w} - (T_m - T_w) - \frac{2V_w(w)}{OZ} (T_m - T_w) \quad (6)$$

$$\delta \rho_f = \delta \rho_m + \delta \rho_w \quad (7)$$

$$\frac{\delta Q}{Q_0} = \frac{\delta n}{n_0} \quad (8)$$

이 때 Q_0 은 出力 100MW 즉 160.3Watts에 該當된다고 假定하였을 때의 값으로서 取扱하였다. 또 各定數는

$$C_m = 0.1633^{watt-sec/°C}$$

$$C_w = 0.2095^{watt-sec/°C}$$

$$h_{mw} = 2.378^{watt-sec/°C}$$

$$\frac{2V_w C_w}{OZ} = 12.42^{watt-sec/°C}$$

그리고 $\tau_1 = \frac{C_w}{h_{mw}} = \frac{1}{11.4}$ sec로 했다.

$$\tau_2 = C_m / h_{mw} + \frac{2V_w C_w}{\Delta Z} = 0.014 \text{ sec}$$

3. Relay¹⁾⁵⁾⁶⁾와 Differential Amplifier

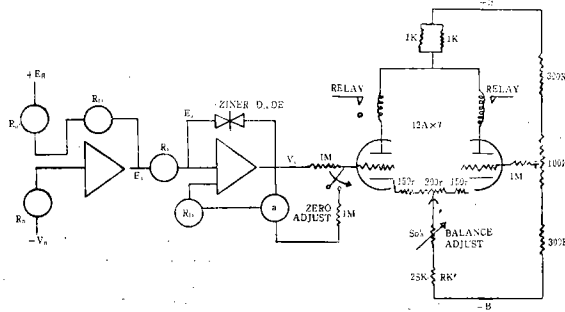


그림2 誤差信號의 差動增幅器

Relay의 動作은 檢出되는 原子爐의 出力과 要求出力과의 差의 信號에 依해서 그림 2와 같이 high gain 增幅器를 거쳐 Relay를 움직일 때

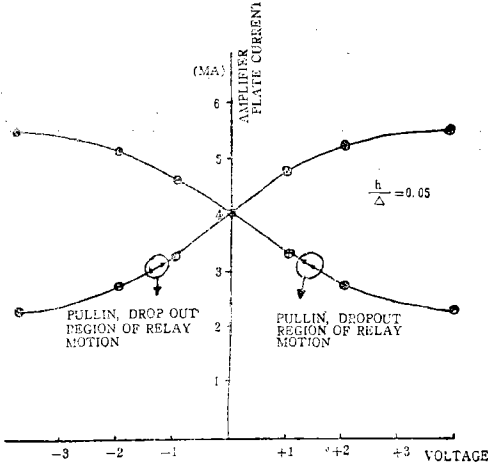


그림 3-a 差動增幅器의 特性

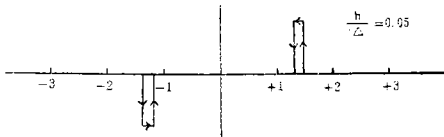


그림 3-b Relay의 特性

Relay의 出力端이 그림 3-b와 같이 hysteresis를 갖는 on-off의 特性으로서 모우터를 움직이는 役割을 하고 있는 것이다.

그림 2를 說明하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

그림 2의 첫째 段에서 Kirchhoff's法則에 依하면 $\Sigma I=0$ 이 된다.

$$\text{故로 } \frac{E_R E_1}{R_0} + \frac{-V_h - E}{R_h} + \frac{E_2 - E_1}{R_1} = 0 \quad (9)$$

$$E_2 = -A_1 E_1 \quad (9')$$

$$\text{故로 } E_2 = \left(-\frac{E_R}{R_0} + \frac{V_0}{R_n} + \frac{E_1}{R_0} + \frac{E_1}{R_h} + \frac{E_1}{R_1}\right) R_1$$

$$E_2 = \left(-\frac{E_R}{R_0} + \frac{V_h}{R_h}\right) R_1 \quad (10)$$

이 때 A_1 은 高利得值로 生覺하였으며 V_n 은 $V_0 + \Delta V$ 와 같다고 假定하였다.

故로

$$E_2 = \left(-\frac{E_R}{R_0} + \frac{V_0}{R_n} + \frac{\Delta V}{R_n}\right) R_1$$

$$E_2 = \left(-\frac{1}{R_0} \frac{E_R}{V_0} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_n} \frac{\Delta V}{V_0}\right) R_1 V_0 \quad (11)$$

을 얻게 된다.

萬一 運轉狀態가 steady state라고 生覺한다면 V_0 은 E_R 과 같게 될 것이다.

따라서 E_2 의 값은

$$E_2 = \left(\frac{R_1}{R_n} E_R\right) \frac{\Delta V}{V} \quad (12)$$

이 된다. 但 R_0 가 R_n 과 같다고 했다. 첫째 段과 같은 方法으로 하던 둘째 段에서도 $\Sigma I=0$, 따라서

$$\frac{E_2 - E_3}{R_2} + \frac{dV_e - E_3}{R_f} = 0 \quad (13)$$

단 E_3 는 $\frac{V_e}{V_2}$ 이다

V_e 에 對해서 (13)式을 풀면

$$V_e = \left(-\frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_2} + \frac{E_3}{R_f}\right) \frac{R_f}{a}$$

$$V_e = -\frac{R_f}{a R_2} E_2$$

$$V_e = -\frac{R_f}{a R_2} \left[\left(\frac{R_1}{R_n} E_R\right) \frac{\Delta V}{V_0}\right] \quad (14)$$

이 된다. (14)式에서 $\frac{R_f}{a R_2} \frac{R_1}{R_n} E_R$ 의 값은 定數이므로

$$K = \frac{R_f}{a R_2} \frac{R_1}{R_n} E_R$$

$$\therefore V_e = -K \frac{\Delta V}{V_0} \quad (15)$$

로 바꾸어 쓸 수 있다. 이 V_e 의 값은 power 10%에서 或은 100%의 다른 값이라 해도 出力이 ΔV 가 0.5%의 變化로 恒常 같은 값을 維持하고 있다는 點을 아래의 例에 依해서 確實히 알게 되었다.

즉 10% 出力에서

$$V_e = -1000 \times (\pm 0.005) = \mp 5.0 \text{ Volts}$$

但 $a = 1.0$ Setting

100% 出力에서

$$V_e = -1000 \times (\pm 0.005) = \mp 5.0 \text{ Volts}$$

但 $a = 0.5$ Setting

이 때 $R_1 = 1 \times 10^6 \Omega$

$$R_2 = 0.1 \times 10^6 \Omega$$

$$R_n = 1 \times 10^6 \Omega$$

$$R_f = 10 \times 10^6 \Omega$$

$$K = 1000$$

이다. 이와같이 要求出力에 關係없이 V_e 가 같으므로 relay 動作에는 大端히 有效하게 動作시킬 수 있는 것이다.

原子爐 自動制御를 爲한 實驗에 있어서는 relay의 動作을 적어도 그림 3-b에서 表示된 것과 같이 $\frac{h}{\Delta}$ 의 값이 0.05보다도 적은 값이어야 될 것이다. 그것은 出力의 應答에 있어서 The rise time, The overshoot percentage 그리고

the steady state 되는 時間等の 問題點으로 定해지는 것이다.

3. 모우터

모우터의 傳達函數는 아래와 같다.

$$K_m E_m(s) = T_m^{-2} \theta_o(s) + S \theta_o(s) \quad (16)$$

$$\therefore \frac{\theta_o(s)}{E_m(s)} = \frac{K_m}{S(T_m S + 1)} \quad (17)$$

이 때 K_m 은 motor constant로서 gain coefficient이다. (0.1)

T_m 은 motor time constant이다. (0.1sec)

E_m 은 motor input value 이다. 이것은 이 實驗에서 적어도 6mv/sec보다 적은 값으로 取했다.

4. Gear의 Backlash

Gear는 機械的 힘을 傳達하는 役割을 하는 것으로 入力인 motor의 움직임에 따라 出力을 얻는 것이다. 그러나 그림4와 같이 Gear自體가 그 結束이 完全치 못하여 非線型的 所謂 Backlash

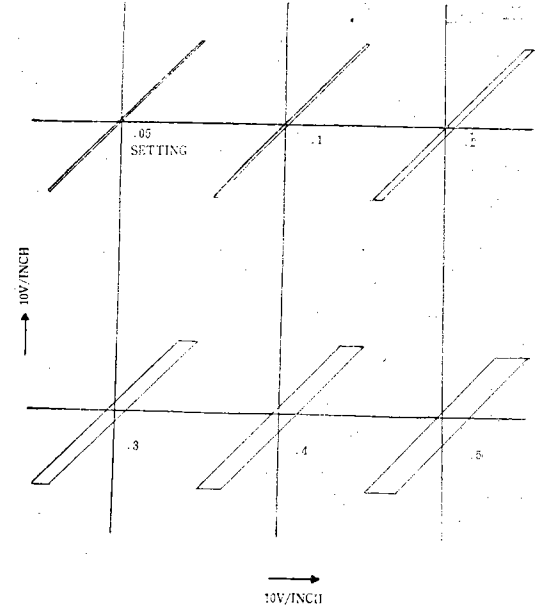


그림4 Back lash의 특성곡선

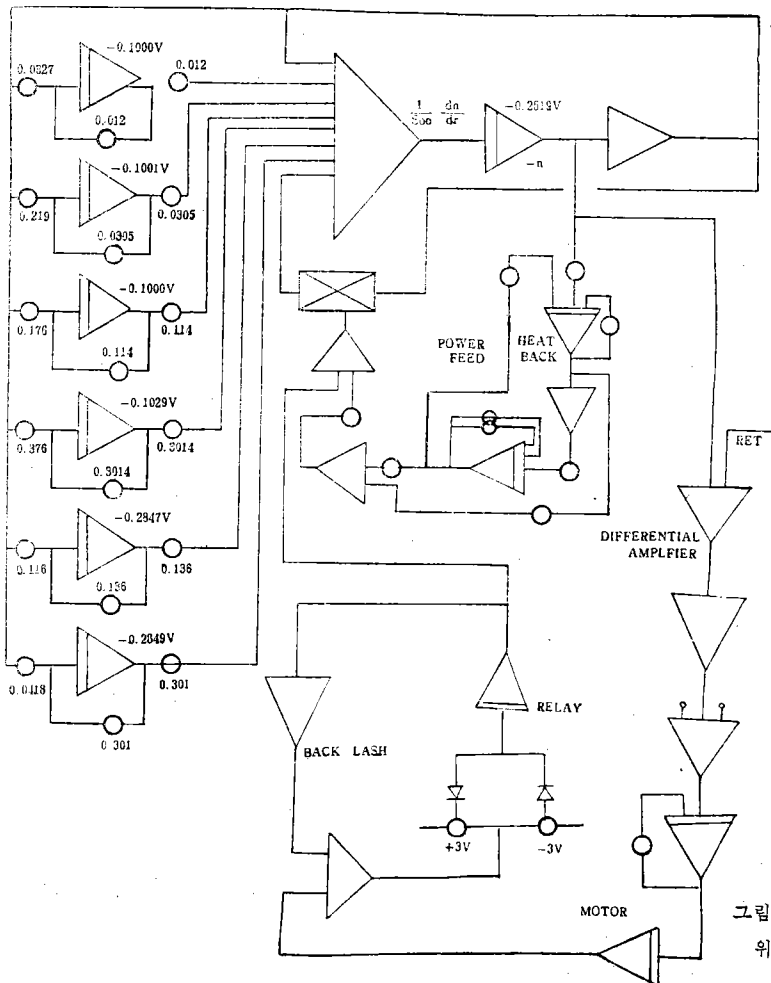


그림5 AARR原子爐특성을 위한 電子計算系統圖

어서 安全한 運轉을 爲하여서는 亦是 問題가 되고 있는 것이다.

그림 4에서 보는바와같이 Backlash의 Setting 값에 따라 要求되는 stability를 定할 수 있는 것이다. 이것은 적어도 0.1보다 적은 값이어야만 安全運轉의 滿足을 줄 수 있는 것이다.

위에서 取扱한 各項은 그림 5와 같은 電子計算器⁸⁾에 適用할 수 있는 體系로 構成할 수 있으며 이때 任意의 要求出力 10%에서 100%의 變化率을 주는 경우 motor speed, Relay 그리고 Backlash 등의 Setting 되는 값에 따라 미치는 영향과 非線型 自動制御의 特性上 그 過渡的 應答을 考察해 보았다.

그림 6에서 보는바와 같이 原子爐의 power feed back이 없을 境遇

Back lash Setting이 0.3 0.1

Relay $\propto \left(\frac{h}{\Delta}\right)$ 이 0.42 0.05

Motor Speed Setting이 0.006 (v 'sec)

0.016 (v 'sec) 0.05 (v 'sec)

으로 했을 때는 制御上 그리 問題가 되지 않으나 그림 7과 같이 Power feed back을 가질 때는

Back lash를 0.3

Relay $\left(\frac{h}{\Delta}\right)$ 를 0.42

Motor Speed를 0.006 (v 'sec)

等으로 잡게하면 Over Shoot Percentage가 훨씬 커져서 Reactor의 Scram이 생기고 境遇에 따라 危險한 狀態가 초래되는 것이다.

그러나

Backlash를 0.1

Relay를 $\frac{h}{\Delta} = 0.05$

Motor Speed를 0.05 (v 'sec)

等으로 하게되면 Settle down되는 時間이 45sec, Power fluctuation이 0.5%를 얻어 制御에 있어서 매우 滿足한 安全性을 주게되는 것이다.

(그림 3參照)

이 때 Backlash를 考慮할 境遇와 考慮치 않을 境遇를 生覺해보면 그림 3-a, 3-b와 같이되어 역시 steady state되는 time과 power fluctuation이 달라져서 steady state time은 45秒에서 80秒로 變하고 power fluctuation은 0.05%에서 2%로 되어 그 差度가 크게 나타남을 알 수 있게 되는 것이다.

結 論

原子爐 制御에 있어서 非線型制御가 위의 本論에서 論한것과 같이 線型的制御에서 印加할수 없는 要求出力을 爲한 變動을 하였을 때도 불구하고 Power fluctuation이 0.5%의 적은 값과 Settle되는 時間도 짧은 값을 얻었다는 點에 있어서 Gear의 Backlash Setting값이나 Relay의

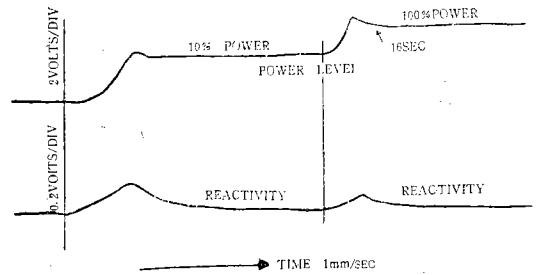


그림6-a Step input 10%에서 100%에 따르는 出力 Back load 0.3 Relay 0.42 Motor speed 0.016c/s

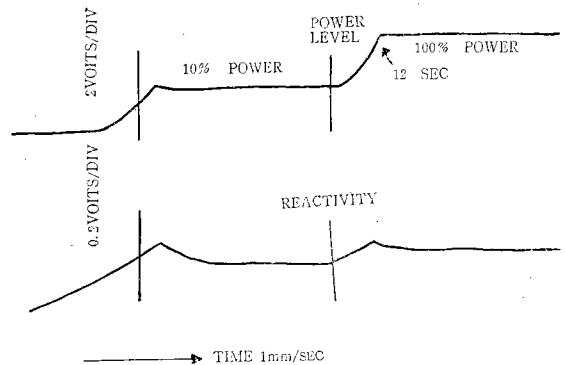


그림6-b Back lash 0.1 Motor speed 0.016c/s Relay 0.42

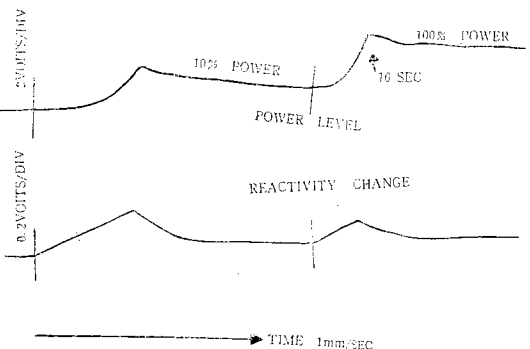


그림6-c Back lash 0.3 Relay 0.05 Motor speed 0.016

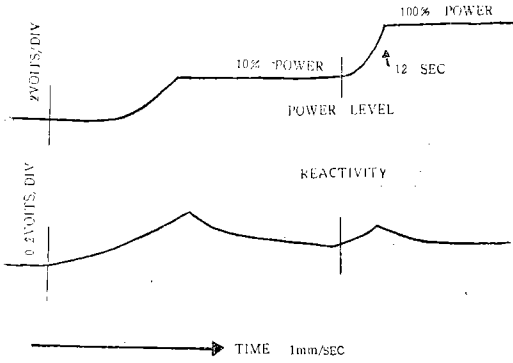


그림 6-d $B=0.1$
 $R=0.05$
 $M=0.016$

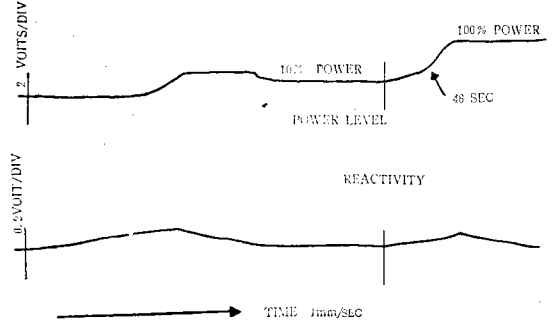


그림 6-g $B=0.3$
 $R=0.05$
 $M=0.006$

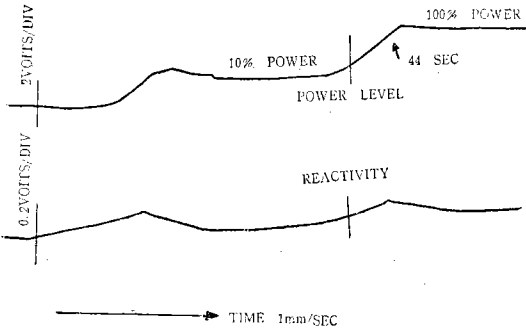


그림 6-e $B=0.3$
 $R=0.42$
 $M=0.006$

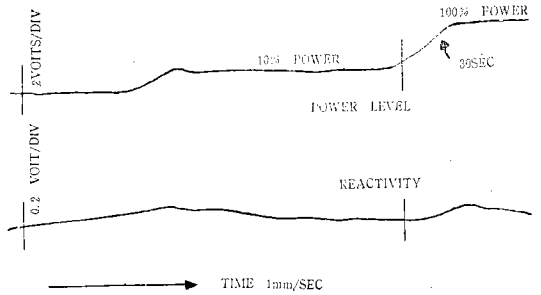


그림 6-h $B=0.1$
 $R=0.05$
 $M=0.006$

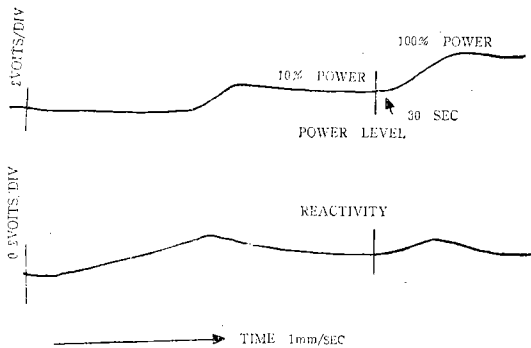


그림 6-f $B=0.1$
 $R=0.42$
 $M=0.006$

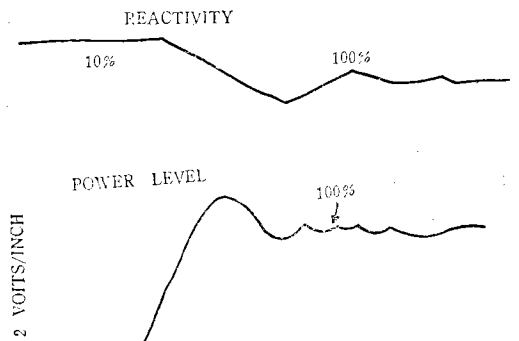


그림 7-a Without Backlash

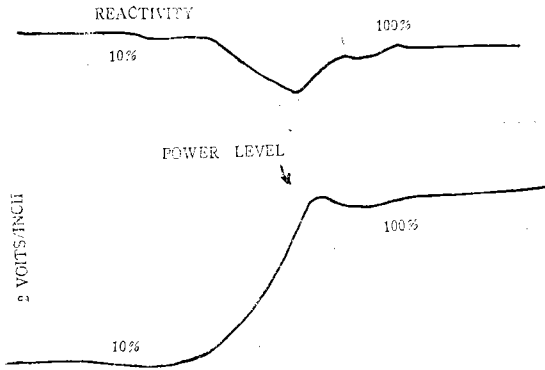


그림 7-b Power response from 10% to 100% with Backlash(Setting 0.1)

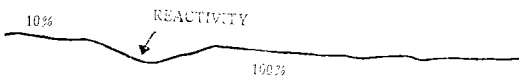


그림 7-c with Backlash (B=0.2)

값등을 設計上 精密히 考慮하게 되던 中性子束의 增加率이 大端히 빠르다 해도 能히 自動적으로 一定한 要求出力을 내기 爲하여 制御를 容易하게 할수 있다는 點을 알수 있는것이다,

The Component

1. Analog Computer
Model 3400-Donner
2. Power Supply
Model 712B-Hewlett-Packard, palo Alto, California
3. Recorder
San born 150

4. Relay Sigma Type Pat, No. 2425092
5RS 12AS-sil
5. Advanced Argonne Research Reactor

參 考 文 獻

1. M. A. Schultz
Control of Nuclear Reactor and Power Plants
pp 30 and 73. 1965
2. Raymond. L. Murray
Nuclear Reactor Physics. P. 160
3. J.H. Tessier
AARR-Dynamic Behavior of the 40-40 Core
Anl p.6 January 1964.
4. J.H. Tessier
Stability Estimate AARR(40-40) Core at 240MW
ANL September 24. 1964
5. R. J. Kochenburger
A Frequency response Method for analyzing
and Synthesizing Contactor Servomechanism.
p272 Vol 69 Part 1. 1950 AIEE Transactions
5. (a) L. Beltracchi
Stability Criteria for a Nonlinear reactor control system IEEE NS-10 1963
6. H. Chestnut and R. W. Mayer.
Servomechanisms and Regulating Design
p. 559. Vol. 1
7. A. E. Rogers and T. W Connolly.
Analog Computations in Engineering Design
p. 429 1960
8. Walter J. Karplus, ph.D., and Walter W. Sovoka Sc.D.
Analog Methods. p. 73 1959
9. W. C. Lipinski
EBR-II Automatic Flux Control System Anl
December 27, 1963
"Reference Instruments for Experiment"
Analog Computer, Model 3400-Donner: Recorder Sanborn 150