

출력 전압과 초전도 자석에 흐르는 전류값에 따라 변화한다고 알려져 있다.

본 연구에서는 유한정정 제어 알고리즘을 도입할때 응답도를 시뮬레이션 해보고 매개변수의 변화에 적응할 수 있는 적응 제어 (adaptive control) 알고리즘을 사용하여 매개변수 추적 (parameter tracking)이 됨을 확인하였다.

2. 본론

그림 2는 적응 제어 알고리즘을 병행한 초전도 자석의 유한정정 제어 (FTSC) 시스템이다.

T는 제어주기이며 3상 교류를 사용하므로 $\frac{1}{60}$ [sec] 또는 $\frac{1}{50}$ [sec]가 일반적이다. T_L은 제어 컴퓨터의 계산시간인데 기종에 따라 다르다.

제어각에 따른 전력변환기의 출력전압식은

$$e_d = e_{do} \cos \alpha - 3X_c i_d / \pi - 2 \cdot V_{th} \quad (1)$$

e_{do} : 무부하 무제어시 출력전압

α : 사이리스터 정호각

X_c : 정류 리액턴스

i_d : 직류출력전류

V_{th} : 사이리스터 순방향 전압강하

이므로 제어컴퓨터에서는 제어각은 (1) 식으로부터 $\alpha = \cos^{-1} [(e_d + 3X_c i_d / \pi + 2V_{th}) / e_{do}]$ (2)

을 계산해서 D/A 변환기를 통해 펄스 발생 장치로 보낸다. $G_{SM}(z)$ 는 소형 초전도 자석에서는 저항과 인덕턴스를 추정하고 직렬 회로로 모델링해서 쉽게 계산할 수 있으나 대용량이 되면 등가회로에 의해 모델링을 하지 않고 임의의 입력전압에 대한 출력전류를 추정해서 z-transform에 의해서 구한다.

2.1 프로세스 모델

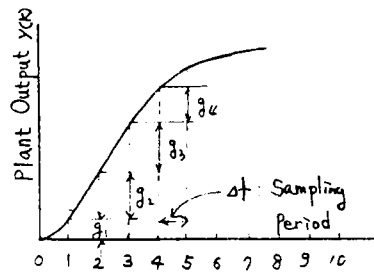


그림3. Typical unit step response of industrial process

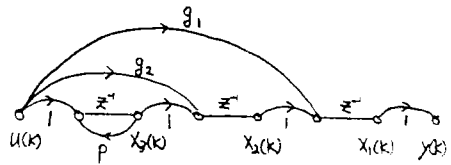


그림4. Signal flow diagram of the plant model (n = 3)

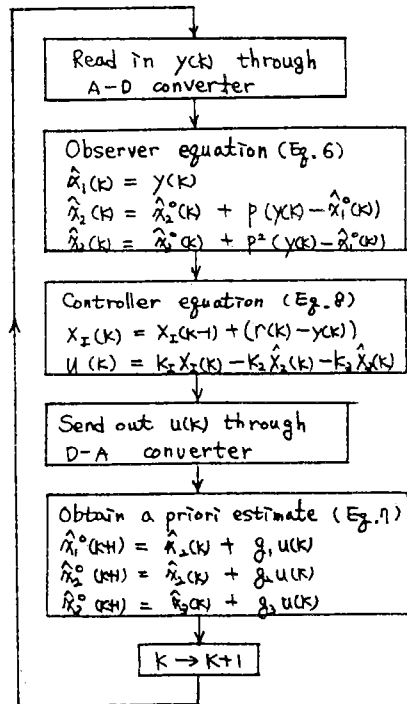


그림5. FTSC Algorithm

어떤 시스템이든 제어를 위해서는 그 시스템을 정확하게 모델링 하여야 한다.

본 연구에서는 단위계단 입력에 대한 응답을 S자 모양 응답 (S-shaped response) 으로 가정을 한다. (그림 3)

이때 전달 함수는

$$G_p(z) = \frac{g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_n z^{-n}}{1 - Pz^{-1}} = \frac{(b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n})}{(1 - Pz^{-1})} \quad (3)$$

P : decaying factor

이 되고 이득이 K_p 일때

$$P = 1 - \frac{g_n}{K_p - \sum_{i=1}^{n-1} g_i} \quad (4)$$

이다.

그림 4는 $n=3$ 일때 신호흐름도 (Signal flow diagram) 이다.

식 (3)의 상태 방정식은

$$X(k+1) = P X(k) + QU(k)$$

$$y(k) = C X(k) \quad (5)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix} \quad \text{and } C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

2.2 상태 변수추정을 위한 관측기 알고리즘

상태관제에서의 가장 큰 어려움은 각 상태를 바로 추정할 수 없는 것이기 때문에 상태를 추정해야 하는데 그 알고리즘은 아래와 같다.

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k) + f[y(k+1) - C\hat{X}(k)] \quad (6)$$

$$\hat{X}(k+1) = P\hat{X}(k) + Q_u(k) \quad (7)$$

$$\hat{X}(0) = 0$$

$$\hat{X}^*(k+1) : \hat{X}(k+1) \text{의}$$

우선추정값 (priori estimate)

$$f = [1 \ P \ P^2 \ P^3 \ \dots \ P^{n-1}]$$

2.3 유한정정제어 알고리즘(FTSC Algorithm)

상태관제 제어를 위한 제어식은

$$U(k) = K_I \sum_{i=0}^k [r(i) - y(i)] - \sum_{j=1}^n K_j X_j(k) \quad (8)$$

K_I, K_j : 제어 이득

X_j : (5)식에서 정의된 상태변수

K_I, K_j 의 계산은 아래와 같다.

$$K_I = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_n} \quad \text{and}$$

$$K_I = 0, K_2 = K_3 = \dots = K_{n-1} = K_I \quad (9)$$

$$K_n = \frac{g_n [(1+P) - (g_1 + g_2 + \dots + g_{n-1})K_I]}{g_n}$$

초전도 자석 전류제어 시스템의 모델링은

대개 $n=3$ 으로 족하다.

$n=3$ 일때의 유한정정제어 알고리즘은 그림

5와 같다.

2.4 매개변수 추적 알고리즘

본 연구에서는 시스템 모델링의 오차를 줄이고 시스템의 매개변수가 변화할때 이를 추적할 수 있도록 다음과 같은 적응 알고리즘을 병행하였다.

$$\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + K_p [e(k) - \hat{y}(k-1)] \quad (10a)$$

$$\hat{b}_i(k) = \hat{b}_i(k-1) + K_i [e(k) U(k-1)] \quad i=1, 2, 3 \quad (10b)$$

$$e(k) = \frac{y(k) - [\hat{P}(k-1)\hat{y}(k-1) + \sum_{i=1}^3 \hat{b}_i(k-1)U(k-i)]}{1 + K_p \hat{y}^2(k-1) + \sum_{i=1}^3 K_i U^2(k-i)} \quad (10c)$$

K_p, K_i : 적응 이득

2.5 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 100KJ 규모의 초전도 자석의 데이터를 가지고 유한정정제어 알고리즘을 적용시켰을때의 단위 계단 입력응답과 잡음에 대한 응답을 시뮬레이션하고 모델링이 틀렸을 경우

적응 알고리즘을 병행하여 매개변수를 추적해 보았다.

시뮬레이션의 데이터는

$$g_1 = 0.968, g_2 = 0.445, g_3 = 0.343$$

$$p = 0.997$$

$$b_1 = 0.968, b_2 = -0.52, b_3 = -0.1$$

일때 단위 계단 입력에 대한 응답은 그림 6과 같다. 그림 7은 단의 잡음에 대한 응답도

이다. 그림 8은 모델링이 잘못 되었을 때

($b_1 = 0.8$) 적응 알고리즘 (식 10)을 적용하였을 때의 출력과 parameter tracking 을 나타낸다.

3. 결과

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 유한정정 제어를 적용시켜 본 결과 만족스런 응답도를 확인하였고 적응 알고리즘을 병행함으로써 모델링 오차와 시간에 따른 시스템 변화에 재 빨리 적응함을 알 수 있었다.

4. 참고문헌

- 1) D.M.Auslander, Y.Takahashi, M.Tomizuka:
Direct Digital Process Control, Proc.
IEEE 66, 2, 199(1978)
- 2) Y.Murakami, T.Taniguchi, T.Hirata, M.
Nishimura: Direct Digital Control of
a Superconducting Magnet, IEEE Trans.
MAG-18, P.866 (1982)
- 3) Y.Takahashi, M.Tomizuka, and D.M.Ausla-
nder, "Simple discrete control of in-
dustrial processes," Trans.ASME, Seri-
es G, J.Dyn.Sys., Meas. and Contr., Vol.
97, no.4, P.354, Dec.1975.

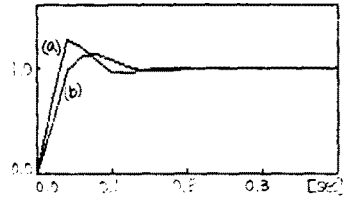


그림6. Unit step response (FTSC with FTSO)

(a) : $G_p(Z) = G_{PM}(Z)$

(b) : $G_p(Z) \neq G_{PM}(Z)$

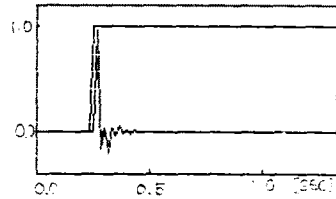


그림7. Response for unit step disturbance

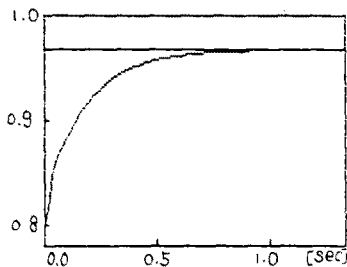
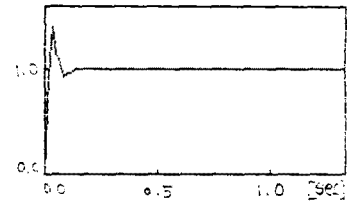


그림8. Parameter tracking by MRAS

(a) step response

(b) Parameter b_1 tracking

- 4) Y.Murakami,M.Nishimura,T.Shintomi,and
M.Masuda,"Identification of control
system of Superconducting magnet,"
IEEE Trans.Mag., vol.MAG-17,no.1,p.525,
Jan.1981.
- 5) A.E.Bryson and Y-C Ho, Applied Optimal
Control. New York: Blaisdell ch.12,
sect.4,1969.
- 6) Yoan D.Landau,Adaptive Control. New
York : dekker.1979.