

수원지 취수공정의 비선형류량조종기 설계와 실현

리준일, 강정수

수원지 물생산의 전반공정에서 취수공정은 첫 공정으로서 그 조종과 관리는 수원지 물생산의 정상화에서 중요한 자리를 차지한다. 관로-뿔프의 비선형특성을 고려한 취수공정의 엄밀한 수학적모형은 정적 및 동적비선형성을 가지며 운전과정에 전압주파수, 전원변동을 포함한 각종 비선형특성의 변화영향을 크게 받게 된다. 선행연구[1]에서는 수원지 관로-뿔프의 비선형특성을 고려한 송수공정의 수학적모형화를, 선행연구[3]에서는 일반물탱크의 수학적모형을 관성분조로 보고 류량에 대한 PID류량조종기를 설계하였으며 선행연구[2]에서는 취수공정의 PLC조종체계구축과 PID류량조종기의 실현문제를 논의하였다.

선행연구[4]에서는 간단화된 Hammerstein모형에 기초한 조종기의 설계방법을 제수변의 정적비선형성을 고려한 비선형조종기설계에 국한시켜 연구하였다.

본문에서는 관로-뿔프-제수변의 비선형특성을 고려하여 취수공정의 비선형류량조종기를 설계하는 한가지 방법을 제시하고 모의 및 현장시험을 통하여 그 효과성을 검증하였다.

1. 취수공정의 비선형류량조종기설계

여기서는 다입력비선형체계의 입출력선형화수법[5]을 리용하여 취수공정의 비선형류량조종기를 설계한다. 선행연구[3]에서 제기한 취수공정의 수학적모형은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dq_i}{dt} = a_{i1}n_i^2 - a_{i2} - a_{i3}q_i^2u_i \\ u_i := f(\alpha_i) = \beta_{i1} + \beta_{i2}\alpha_i + \beta_{i3}\frac{1}{\alpha_i} \end{cases}, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

여기서 첫 식은 뿔프와 관로의 류체력학적특성으로부터 결정되는 비선형미분방정식, 둘째 식은 전동제수변과 관로의 비선형특성을 반영하는 대수방정식이다.

상태변수 $q^T = [q_1 \ q_2]$ 를 도입하면 출력방정식은 다음과 같이 근사화된다.

$$y_i = h_i(q) = c_{i1}q_1 + c_{i2}q_2, \quad i=1, 2 \quad (2)$$

수원지의 물생산량을 결정하는 목표수위를 $y_r^T := [y_{1r} \ y_{2r}]$ 로 표시할 때 조종목적은

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{y} := y - y_r = 0 \quad (3)$$

을 만족하는 전동제수변의 열림도 $\alpha^T := [\alpha_1 \ \alpha_2]$ 를 결정하는것이다. 여기서 기호약속 $y^T := [y_1 \ y_2]$, $u^T := [u_1 \ u_2]$ 를 리용하였다.

먼저 u_i 들을 조작량으로 가상하고 조종기를 구성하자.

이를 위해 식 (2)에 도함수를 취하고 식 (1)을 대입하면 다음식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{dy_i}{dt} &= c_{i1}(a_{11}n_1^2 - a_{12} - a_{13}q_1^2u_1) + c_{i2}(a_{21}n_2^2 - a_{22} - a_{23}q_2^2u_2) = \\ &= c_{i1}a_{11}n_1^2 + c_{i2}a_{21}n_2^2 - c_{i1}a_{21} - c_{i2}a_{22} - c_{i1}a_{13}q_1^2u_1 - c_{i2}a_{23}q_2^2u_2\end{aligned}\quad (4)$$

비선형류량공정의 상대차수가 2라는것을 식 (4)로부터 쉽게 알수 있으므로 비선형조종기설계의 다입력입출력선형화수법이 쉽게 적용된다.

기호 $N^T := [n_1^2 \ n_2^2]$ 를 도입하면 식 (4)는 다음의 벡토르형식으로 표시된다.

$$\frac{dy}{dt} = AN - D - BC(q)u \quad (5)$$

여기서

$$C(q) = \begin{bmatrix} q_1^2 & 0 \\ 0 & q_2^2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} c_{11}a_{11} & c_{12}a_{21} \\ c_{21}a_{11} & c_{22}a_{21} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} c_{11}a_{21} & c_{12}a_{22} \\ c_{21}a_{21} & c_{22}a_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} c_{11}a_{13} & c_{12}a_{23} \\ c_{21}a_{13} & c_{22}a_{23} \end{bmatrix}$$

이다.

그러면 조종목적 (3)을 만족시키는 u 는 다음식으로 결정할수 있다.

$$\dot{\tilde{y}} + \Gamma\tilde{y} = 0, \quad \Gamma = \text{diag}[\gamma_i] \quad (i=1, 2) \quad (6)$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 다음의 관계식이 나온다.

$$AN - D - BC(q)u + \Gamma\tilde{y} = 0 \quad (7)$$

$\forall q \in Q (q \neq 0)$ 에 대하여 $\det C(q) \neq 0$ 임을 고려하면 식 (7)을 만족시키는 비선형조종기는 다음과 같이 구성된다.

$$u = C^{-1}(q)B^{-1}[AN + \Gamma\tilde{y} - D], \quad \det(B) \neq 0 \quad (8)$$

이 조종기에서 $C^{-1}(q)$ 는 측정불가능한 상태 q 를 포함하므로 출력방정식 (2)를 고려하면 다음의 관계가 성립한다.

$$y = h(q) = \begin{bmatrix} h_1(q) \\ h_2(q) \end{bmatrix} \Rightarrow q = h^{-1}(y) \quad (9)$$

여기서 변환 h 는 가역이라고 가정하였다. 그러면 식 (8), (9)로부터 출력반결합비선형조종기는 다음과 같이 표시된다.

$$u = C^{-1}[h^{-1}(y)]B^{-1}[AN + \Gamma\tilde{y} - D] \quad (10)$$

다음 가상조작량 u 로부터 전동제수변열림도 $\alpha^T = [\alpha_1 \ \alpha_2]$ 를 구하자.

식 (2)에서 변환 f 가 가역이라고 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\alpha_i = f^{-1}(u_i), \quad i=1, 2 \quad (11)$$

따라서 취수공정전동제수변들의 비선형출력반결합조종기는 식 (10), (11)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{cases} u = B^{-1}C^{-1}[h^{-1}(y)][AN + \Gamma\tilde{y} - D] \\ \alpha_i = f^{-1}(u_i), \quad i=1, 2 \end{cases} \quad (12)$$

수위 y 와 류량 q 사이의 관계식은 선행연구[1]로부터

$$h_1(q) = 0.664q_1 + 0.163 \ 2q_2, \quad h_2(q) = 0.337q_1 + 0.835 \ 6q_2$$

로 표시되며 이 식으로부터 거울변환 $h^{-1}(y)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$q_1 = 0.905 \, 1y_1 + 0.105 \, 1y_2, \quad q_2 = 0.105 \, 1y_1 + 0.905 \, 1y_2$$

한편 식 (1)의 둘째 식으로부터

$$\beta_{i3} + \beta_{i4}\alpha_i + \frac{\beta_{i5}}{\alpha_i} = u_i, \quad i=1, 2 \quad (13)$$

임을 고려하면 전동제수변열림도 $\alpha_i = f^{-1}(u_i)$ ($i=1, 2$)는

$$\alpha_{i(1, 2)} = \frac{u_i - \beta_{i3} \pm \sqrt{(\beta_{i3} - u_i)^2 - 4\beta_{i4}\beta_{i5}}}{2\beta_{i4}}$$

로 표시된다. $u_i > \beta_i$ 일 때에만 $\alpha_i > 0$ 이므로 두 풀이중 최소값을 택하면

$$\alpha_{i(1, 2)} = \frac{u_i - \beta_{i3} - \sqrt{(\beta_{i3} - u_i)^2 - 4\beta_{i4}\beta_{i5}}}{2\beta_{i4}} \quad (14)$$

를 얻는다.

여기에 기초하여 출력반결합비선형류량조종체계를 구성하면 그림 1과 같다.

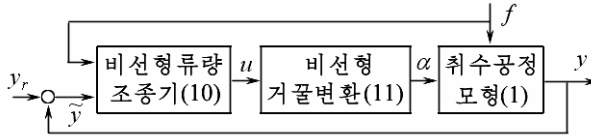


그림 1. 출력반결합비선형류량조종체계의 구성도

2. 모의 및 현장실험결과

우선 모의를 위해 취수공정의 공칭파라미터값을 식 (1)에 대입하면 다음의 파라미터행렬을 얻게 된다.[3]

$$A = \begin{bmatrix} 4.426 \cdot 10^{-7} & 1.047 \cdot 10^{-7} \\ 2.246 \cdot 10^{-7} & 5.365 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 4.281 \cdot 10^{-7} \\ 2.254 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 4.879 \cdot 10^{-6} & 1.164 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \\ 2.476 \cdot 10^{-6} & 5.962 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

그리고 증폭계수를 $k=0.005$ 1로 주고 목표수위를 50min동안은 $y_r=[0.6 \ 0.64]$ 로, 그다음에는 $y_r=[0.69 \ 0.73]$, 주파수 $f=48\text{Hz}$, 수위초기값을 $y=[0.2 \ 0.3]$ 으로 주었을 때 식 (12)를 리용한 비선형조절기모의결과는 그림 2와 같다.

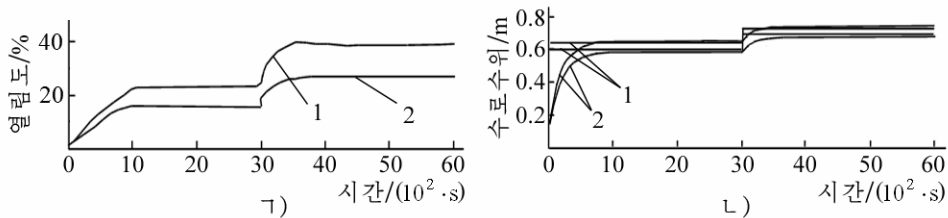


그림 2. 비선형조절기모의그래프

ㄱ) 제수변열림도($1-\alpha_2$ 일 때, 2- α_1 일 때), ㄴ) 수위(1-목표수위, 2-실제수위)

그림 2로부터 과도시간은 수로 1에서 7min, 수로 2에서 8min이며 정상편차는 거의 없으므로 다가간다는것을 알수 있다.

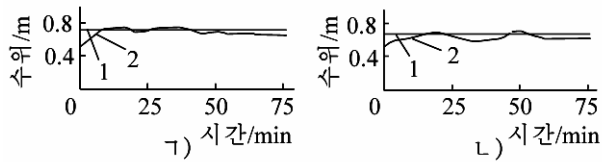


그림 3. 비선형류량조절기를 리용한 현장시험곡선
 ㄱ) 수로 1, ㄴ) 수로 2: 1-목표수위, 2-실제수위

비선형류량조절기를 취수공정에 도입한 현장시험결과를 그림 3에 보여주었다. 목표수위를 $y_r = [0.71 \ 0.73]$, $k = 0.005 \ 1$, 조종주기는 3min으로 설정하였다. 현장시험결과 과도시간은 8min, 정상편차는 0.1m로 주어진다.

맺는 말

수원지 취수공정의 비선형류량조종기설계의 한가지 방법을 제기하고 모의 및 현장은 전시험을 통하여 그 효과성을 검증하였다.

모의 및 현장시험결과는 종전의 PID류량조종기[2]가 뿔프 및 제수변의 비선형특성의 영향으로 좋지 못한 과도특성과 정상편차의 존재를 보여주는데 비해 제안된 비선형류량조종기가 비선형성의 영향하에서도 목표값을 정상편차없이 추정한다는것을 보여주었다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 57, 10, 65, 주체100(2011).
- [2] 조현성 등; 전기, 자동화공학 3, 35, 주체100(2011).
- [3] 리준일 등; 정보기술, 3, 27, 주체100(2011).
- [4] K. A.Wise; Robust and Adaptive Control with Aerospace Applications, Springer, 408~415, 2013.
- [5] Zhengtao Ding; Nonlinear and Adaptive Control Systems, IET, 75~88, 2013.

주체105(2016)년 9월 5일 원고접수

Design and Implementation of Nonlinear Flow Controller for Intake Process in Reservoir

Ri Jun Il, Kang Jong Su

We considered a design method of nonlinear flow controller for intake process in reservoir. Using input-output linearization techniques of nonlinear system, the nonlinear flow controller is designed based on nonlinear model including nonlinear dynamics between pumps, pipes and valves.

Key words: nonlinear control, flow control