

# 디지털 조속기 개발을 위한 수력터빈 시스템의 모델동정과 제어기의 최적화에 관한 연구

전일영<sup>\*</sup> · 조성훈<sup>\*</sup> · 전내석<sup>\*</sup> · 이성근<sup>\*</sup> · 김윤식<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>한국해양대학교

A study on the model identification and controller optimization of the  
hydro-turbine system for development of digital governor

Il-Young Jeon<sup>\*</sup> · Seung-Hun Cho<sup>\*</sup> · Nae-Suck Jeon<sup>\*</sup> · Sung-Geun Lee<sup>\*</sup> · Yoon-Sik Kim<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Korea Maritime University

E-mail : k981105g@hanbada.kmaritime.ac.kr

## 요 약

본 논문은 수력터빈시스템에서 동력학 시스템 모델의 매개변수를 얻기 위해 유전알고리즘과 모델 조정기법을 적용하고, 수력터빈시스템으로부터 취득한 실제 운전데이터를 사용하여 계수값을 얻었다. 완성된 모델과 실제시스템의 출력 데이터와 비교하여 유효성을 검증한다.

완성된 모델에 유전알고리즘을 이용하여 제어기의 최적 PID 이득값을 찾을 수 있도록 하였으며, 디지털 조속기의 적용시에 발생할 수 있는 시행착오를 줄이도록 하는데 목적이 있다고 하겠다.

## ABSTRACT

In this paper, hydro-turbine system is modelled. Real input and output signals are acquired from the hydro-turbine system and the parameters of the model are estimated using input-output data, the model adjustment technique and a genetic algorithm(GA).

To verify feasibility of the proposed model, computer simulations using GA have been carried out. The results show excellent characteristics of the proposed modeling and identification of the hydro-turbine system.

## I. 서 론

70년대 초기부터 일반적으로 사용되어져 왔던 과거의 수력터빈의 모델들은 전형적으로 1차의 안정도 시뮬레이션에 적합한 것으로 알려져 있다. 오늘날에는 진보된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 발전으로 장시간의 과도상태 안정도 시뮬레이션이 가능해 졌다. 따라서 이러한 1차의 안정도 시뮬레이션에서 사용되던 터빈의 모델보다는 좀더 정확하고 복잡한 모델이 필요하게 되었다. 이러한 모델구조를 얻어냄으로써 수력터빈의 물리적인 동작의 해석 및 시뮬레이션이 가능하게 된다.<sup>[1]</sup> 좀더 복잡하고 정확한 모델로는 작은 주파수의 변동, 독립된 시스템의 운전, 부하의 감발, 부하의 허용, 수격작용의 역학관계 그리고 복잡한 수력학의 구조를 가진 양수발전등을 고려한 모델등을 생각할 수 있다.<sup>[2]</sup>

수력터빈-조속기의 모델링에 대한 연구는 일반적으로 다양한 수력학의 모델로 인해 광범위한 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 물공급 수관을 포함한 원동기 모델의 매개변수를 얻기

위해 유전알고리즘과 모델조정기법을 이용하였다.

## II. 본 론

수차는 물이 가진 고낙차의 위치에너지를 제어밸브의 출력을 통해 노즐이나 베인을 통하여 속도에너지의 형태로 수차 런너를 회전시킨다. 이러한 수차터빈의 모델을 얻기 위하여 동적 시스템을 수학적으로 표현하고 모델의 파라미터를 추정한다. 섬진강 수력발전소를 본여구의 대상 시스템으로 선택하였으며, 섬진강 수력 발전소의 수차 터빈 시스템에서는 서보모터 액츄에이터, 메인 서보모터, 수차와 발전기를 모두 포함하여 제어대상으로 간주하고 있다. 제어대상의 각 요소들은 비선형 요소들을 포함하고 있고, 발전부의 운전조건에 따라 각 요소의 파라미터가 달라지기 때문에 정확한 모델을 얻는 것은 어려우나, 제어대상을 선형시불변인 공칭모델(Nominal model)로 기술할 수 있다. 수차 터빈

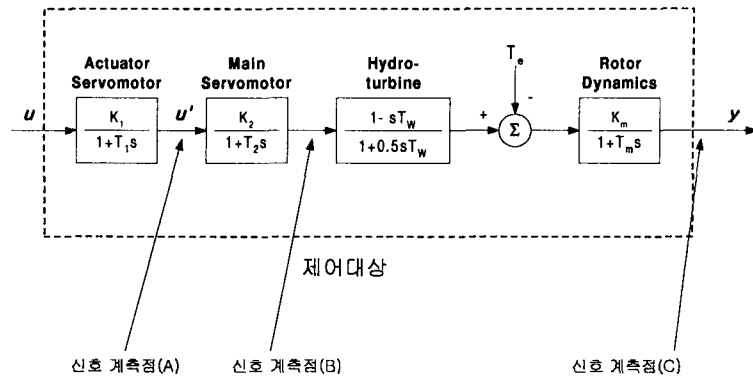


Fig. 23 제어대상의 블록선도

에 대한 제어기의 입력부터 출력까지의 관계를 블록선도로 나타내면 Fig.1과 같다.

Fig. 1의 블록선도로부터 제어대상의 입출력 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$Y(s) = \frac{K_1 K_2 (1 - T_w s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + 0.5 T_w s)} U(s) - \frac{K_m}{(1 + T_m s)} T_e(s) \quad (1.1)$$

여기서  $u$ 는 수동의 기계식 제어입력이고  $u'$ 는 수동의 기계식 제어입력에 따른 액츄에이터 서보모터의 출력으로서 메인 서보모터로의 입력이다.  $y$ 는 터빈 회전수(속도),  $T_e$ 는 전기적 부하 토크 신호이고  $K_1$ 는 액츄에이터 서보모터의 이득,  $K_2$ 는 메인 서보모터의 이득,  $T_w$ 는 물의 시정수이다. 한편  $T_1$ 는 액츄에이터 서보모터의 시정수,  $T_2$ 는 메인 서보모터의 시정수,  $T_m$ 는 수차 로터를 포함한 발전기의 시정수이다. 단, 여기서 현장의 조건이 수동의 기계식 제어입력  $u$ 를 측정하기 위한 조건이 어려워 측정하지 못하고 수동의 기계식 제어입력에 따른 액츄에이터 서보모터의 출력으로서 메인 서보모터로의 입력인  $u'$ 의 신호를 계측하고 이후를 하나의 제어대상으로서 모델링하였다. 무부하 상태를 고려하면

$$Y(s) = \frac{K_1 K_2 (1 - T_w s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + 0.5 T_w s)} U'(s) \quad (1.2)$$

$$= \frac{K(1 - T_w s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + 0.5 T_w s)} U'(s) \quad (1.3)$$

단,  $K = K_1 K_2$

식 (1.3)으로부터 제어입력  $u'$ 에서 출력 회전수까지의 전달함수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{Y(s)}{U'(s)} = \frac{-b_2 s + b_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } a_1 &= \frac{(T_1 + T_2) T_w + 2 T_1 T_2}{T_1 T_2 T_w} \\ a_2 &= \frac{2(T_1 + T_2) + T_w}{T_1 T_2 T_w} \\ a_3 &= \frac{1}{T_1 T_2 T_w} \\ b_2 &= \frac{2K}{T_1 T_2} \\ b_3 &= \frac{2K}{T_1 T_2 T_w} \end{aligned}$$

정격상태에서 수로의 입구부터 출구관까지의 물의 관성으로 인한 물 시정수  $T_w$ 는 다음의 식에 의해 얻어진다. 실제적인 물 시정수의 값을 추정할 경우, 유량, 중력 가속도 및 정격 수두의 값들은 수차의 설계자료를 참고하면 상수로 결정되고 수압관의 길이  $L$ 과 수압관의 단면적  $A$ 는 설계자료를 기초로 추정하여 근사화된다.

$$T_w = \frac{Q_r}{g H_r} \int \frac{dL}{A} \approx \frac{Q_r}{g H_r} \Sigma \frac{L}{A} \quad (1.5)$$

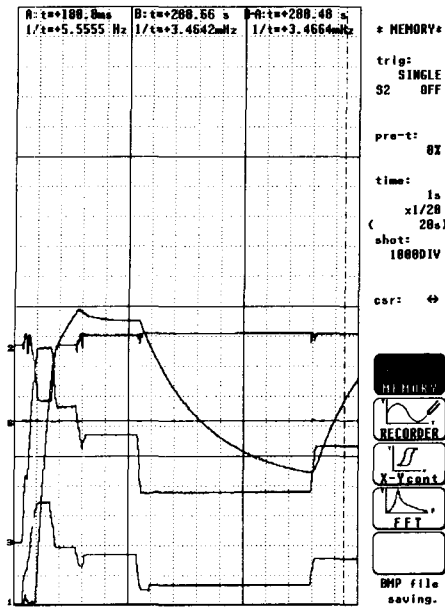


Fig. 24 Recorder로 계측한 신호

- 단,  $A$  = 수압관 각 부의 단면적 ( $m^2$ )
- $L$  = 각 부의 단면적에 상응하는 길이 (m)
- $Q_r$  = 정적 유량 ( $m^3/s$ )
- $H_r$  = 정적 수두 (m)
- $g$  = 중력 가속도 (9.8 ㄱ)

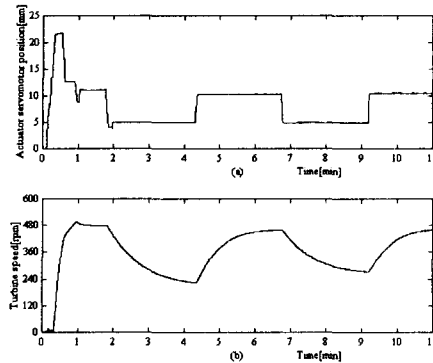
### III. 입출력 신호의 계측

시스템 모델의 구조와 차수가 결정되면 파라미터를 추정하기 위하여 실험적 방법으로 입출력 신호의 계측이 요구된다. 발전 시스템의 기동부터 측정하여 무부하로 운전되는 동안 기계 유압식 조속기의 수동 서보모터 조정장치를 이용하여 설정치를 일정한 스텝으로 증감하면서 입력시킨 후 속도 및 서보모터들의 변동을 계측하였다. 신호의 계측은 HIOKI 사의 Thermal Array Recorder를 사용하였다. Fig.2는 HIOKI Recorder로 계측한 신호의 일부를 보여주고 있다.

Fig.3은 같은 실험을 통해 계측한 두 신호를 그린 것이다. Fig.3(a)는 액츄에이터 서보모터의 출력 즉, 메인 서보모터로의 출력을 나타내고 있고  $u$ 의 신호에 대응한다. Fig. 3(a)는  $u$ 의 입력에 따른 수차 터빈의 회전수의 변동을 나타내고 있다.

### IV. 유전알고리즘을 이용한 모델의 파라미터 추정

### 유전 알고리즘과 모델조정기법(Model adjust-



(a) 제어입력 (액츄에이터 서보모터의 출력)  
(b) 출력 (수차터빈의 회전수)  
Fig. 25 무부하 운전시 시스템의 응답

ment technique)을 이용하여 발전시스템 모델의 파라미터를 추정할 수 있다. 계측된 입력 신호를 조정모델(Adjustable model)에 인가하였고, 유전알고리즘은 시스템 출력과 모델의 출력차가 최소가 되도록, 즉 모델의 동특성이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 모델의 파라미터를 조정하게 된다.<sup>[3]</sup> 이 때 모델을 초기화하기 위하여 모든 상태변수의 측정이 요구된다. 기술적 또는 경제적인 문제로 측정이 어려운 신호는 측정신호와 그 신호의 시간 지연된 신호를 이용해서 근사적으로 추정할 수 있다. 상태변수를  $x_j = y^{(j-1)}$  ( $1 \leq j \leq 3$ )로 정의하면, 회전수  $x_1 = y$ 만이 측정이 가능하므로 나머지 상태변수는 다음 식으로부터 계산된다. 여기서,  $y^{(j)}$ 는  $y$ 의  $j$ 차 도함수를 의미한다.

$$x_j(t) = \left( \frac{1-\Delta}{T} \right)^{j-1} y(t) = \sum_{m=0}^{j-1} \frac{1}{T^{j-1}} \frac{(j-1)!}{m!(j-m-1)!} (-1)^m y(t-mT) \quad (2 \leq j \leq 3) \quad (1.6)$$

여기서  $\Delta$ 는  $\Delta z(t) = z(t-T)$ ,  $\Delta^j z(t) = \Delta^{j-1}[z(t-T)]$  인 관계를 가지는 연산자이고,  $y(t-mT)$ 는  $y(t)$ 의  $mT$  시간 지연된 신호이다.

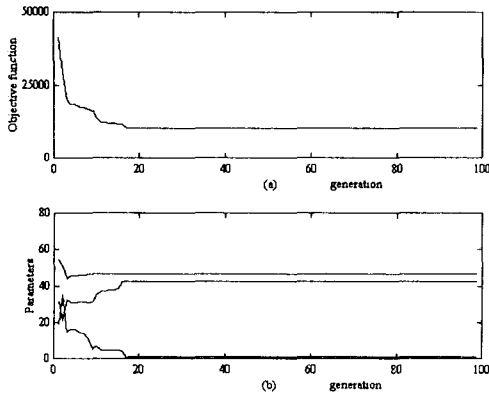
물 시정수  $T_w$ 는 식(1.5)로부터 구할 수 있으므로 본 논문에서는 세가지 파라미터  $K$ ,  $T_2$ ,  $T_m$ 를 추정하도록 한다. 집단이 진화해 가는 동안 유전 알고리즘은 집단내 개체간의 우열, 즉 각 개체로부터 복호화된 파라미터로 설정된 모델의 성능을 평가하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 적합도는 적절히 정의되는 목적함수로부터 계산된다. 본 논문에서는 유한시간 동안만 계산되는 다음 식을 목적함수로 이용한다.

V. 결 론

본 논문에서는 섬진강 수력발전소 2호기 수차 터빈에서 실측한 데이터와 유전알고리즘, 파라미터 추정기법을 이용하여 섬진강 수력발전소의 수차 터빈을 추정하는 문제를 연구하였다. 이를 위하여 실제 발전소 현장에서 데이터를 계측하였고, 제안된 수차 터빈의 모델을 이용하여 파라미터를 추정하였다. 이렇게 추정된 파라미터와 모델을 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 시스템의 응답을 살펴본 결과 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. W. Ordys, A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi and M. J. Grimble, Modelling and Simulation of Power Generation Plants, Springer-Verlag, 1994
- [2] Ioan Dore Landau, System Identification and Control Design, Prentice Hall, 1990
- [3] 진강규저, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000



(a) 목적함수 (b) 추정 파라미터  
Fig. 26 파라미터 추정과정

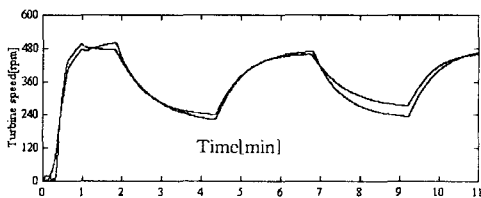


Fig. 27 실제 시스템과 모델의 응답비교

$$J(\varphi) = \sum_{j=1}^W |y_p(j) - y(j)| \quad (1.7)$$

여기서  $\varphi = [K \ T_2 \ T_m]^T$ 는 조정되는 파라미터 벡터이고,  $W$ 는 데이터의 크기이다. 상기의 최적화 문제에서 유전알고리즘은 목적함수의 값이 최소가 되도록  $\varphi$ 를 조정해 나간다.

본 논문에서는 적응자로 유전알고리즘을 사용하였고, 제어 파라미터로 집단크기  $N=12$ , 재생산 계수  $\eta_i = 1.8 \ (1 \leq i \leq N)$ , 교배 확률  $P_c = 1$ , 돌연변이 확률  $P_m = 0.005$ , 스케일링 윈도우  $W_s = 1$ 을 사용하였다.  $K, T_2$ 와  $T_m$ 은 각각 7비트 길이의 이진 스트링으로 부호화하였고, 탐색 구간은  $0.1 \leq K, T_2, T_m \leq 70$ 으로 설정하였다. 데이터 크기는  $W = 3,300$ 이다.

계산된  $T_m$ 값은  $1.1[\text{sec}]$ 이고 추정치로  $\hat{K} = 46.33, \hat{T}_2 = 1.20[\text{sec}], \hat{T}_m = 42.48[\text{sec}]$ 를 얻을 수 있었다. Fig.4는 파라미터 추종 시뮬레이션을 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 유전알고리즘은 약 18세대에서 해를 찾을 수 있었다.

Fig.5는 실제 시스템과 모델의 출력응답을 비교한 것이다. 각 구간에서 약간의 오차가 있지만 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 오차의 대부분은 수차 터빈 시스템의 비선형성, 계측 시 오차 및 잡음 등에 기인하는 것으로 생각된다.