

## 모델링 오차와 파라미터변동을 고려한 상태 관측기 설계

김 찬 기

전력 연구원 시스템 통신 연구소

### State Observer Design Considering Modelling Errors and Parameter Variations

Chan-Ki Kim

Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - IP speed controller is used as a main controller and it makes the system low overshoot and easy controllability. Load torque is estimated by Kalman filter algorithm and parameter controller is used against a rotor inertia negative variations. Parameter Controller (PC) is equipped with a torque observer implemented by software of a digital signal processor. PC is a parameter controller which selects a moment of inertia J in responding to a load torque to control the system response.

확실성 면에서 탁월한 성능을 발휘하는 장점을 가지고 있다. 이러한 제어이론을 시스템에 적용하려고 할 경우에는 단순히 제어이론의 우수성만을 가지고 시스템에 적용할 수는 없고 다음과 같은 시스템 성능 평가함수를 도입하여 결정해야 한다.

#### 1. 서 론

그림1은 현대 제어이론과 PI제어기의 시스템 성능을 간략하게 평가한 것이다. 일반적으로 시스템의 제어문제는 서보문제와 레귤레이터 문제로 나눌 수 있다. 서보문제는 기준 값을 얼마나 잘 추종하느냐의 문제이며 레귤레이터 문제는 외란을 어떻게 제거하여 오차를 영(零)으로 보내느냐는 문제이며 대부분의 제어이론은 이러한 서보문제나 레귤레이터 문제 또는 서보 문제나 레귤레이터 문제를 동시에 해결하고자하는 노력의 일환이다. 현대제어 이론 중에서 Dead-Beat제어는 시스템이 시간지연없이 가장 빠른 시간내에 시스템의 지령치에 도달하게 하는 제어이론으로 연속시간계에서는 존재하지 않으며 이산 시간영역에서만 존재하는 제어기로 시스템의 샘플링타임이 높아지면 시스템 입력이 무한히 커지고 외란에 민감하다는 단점을 가지고 있다. 반면에 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 상태 공간영역에서 시스템이 외란에 무관하게 무조건 수렴하도록 스위칭을 하는 제어이지만 불연속제어 입력으로 인해서 시스템에 잡음과 시간 지연이 존재하는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 칼만필터나 관측기를 가진 2자유도 제어의 경우는 시스템의 외란이나 불

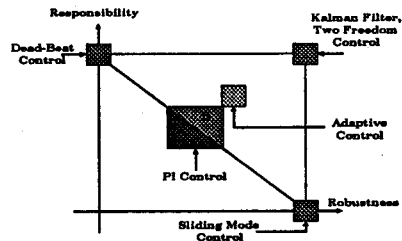


그림 1 PI제어기와 현대 제어이론의 제어 성능 평가

$$Y = K1 * Robustness + K2 * Responsibility + K3 * Economics$$

여기서 Y : 시스템 성능 평가량  
 K1 : 강인성에 대한 가중치  
 K2 : 응답성에 대한 가중치  
 K3 : 경제성에 대한 가중치

위의 평가함수를 도입하면 각종 제어이론을 평가하면 PI제어기가 가장 높은 값을 가지고 있기 때문에 현재로서는 PI제어기나 PI제어기의 변형제어기가 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 실정이다. 평가함수가 높게 나오는 제어기를 정리해 보면 다음과 같다.

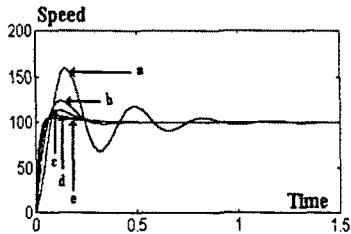
- o IP제어기(주제어기)+상태관측기(보조제어기)
- o 주제어기
  - 퍼지 슬라이딩 모드 적응제어기
  - PI제어기나 IP제어기

-IP제어기나 PI제어기 + Bang-Bang제어기

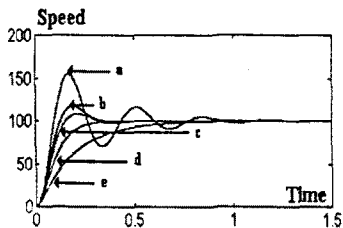
## 2. 본 론

### 2.1 PI 속도 제어기와 IP 속도제어기

그림 2는 PI제어기와 IP제어기의 과도 응답특성을 나타낸 것으로써 (a)  $\xi=0.2$ , (b)  $\xi=0.3$ , (c)  $\xi=0.5$ , (d)  $\xi=1$  (e)  $\xi=2$  일때를 나타낸 것이다. 먼저 전체적인 시간응답의 비교에서 IP 제어기가 PI 제어기보다 시스템의 제동비에 따라 쉽게 제어됨을 알 수 있는데 이는 PI제어기의 분자항의 s항의 계수에 대한 유무에서 기인하는 것이다. 그러나 두 시스템은 부하 토크에 대한 전달함수가 식 (3)과 같이 동일한 형태를 갖기 때문에 외란에 대해서는 동일한 응답특성을 가진다. 식 (1)과 식(2)는 각각 PI 속도제어기와 IP 속도제어기의 closed-loop 시스템의 전달함수이다. 두 수식을 고려해보면, PI제어기와 비교해서 IP 제어기는 분자에 s항이 없다. 그래서 IP 제어기를 사용하면 분자에 dynamics가 없는 시스템 응답을 쉽게 설계할 수 있는 것이다.



a) PI 제어기의 과도특성



b) IP 제어기의 과도특성

그림 2 PI제어기와 IP 제어기의 과도특성비교

$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{K_T K_{PS} + K_T K_I}{J s^2 + (B + K_T K_P) s + K_T K_I} \quad (1)$$

J : load inertia

B : load viscous friction coefficient

$K_P$  : 속도제어기 P gain

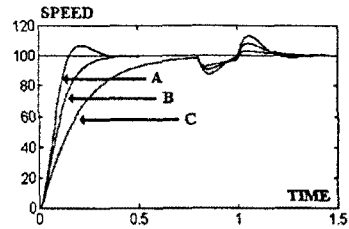
$K_q$  : torque constant

$K_I$  : 속도제어기 I gain

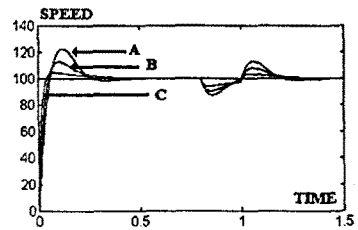
$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{K_T K_I}{J s^2 + (B + K_T K_P) s + K_T K_I} \quad (2)$$

$$\frac{\omega_r}{T_L} = \frac{s}{J s^2 + (B + K_T K_P) s + K_T K_I} \quad (3)$$

그림 3은 PI제어기와 IP제어기의 부하응답특성을 나타낸 것으로 이와같이 PI 속도제어기로서는 속도지령의 스텝변화에 대한 전동기 속도의 응답 오버슈트가 작으면서 동시에 부하토크의 스텝변화에 대한 속도 응답의 회복시간도 짧은 속도제어기를 실현하는 것이 곤란함을 알 수 있다.



a) IP제어기의 부하 응답특성



b) PI제어기의 부하 응답특성

그림 3 PI제어기와 IP 제어기의 부하응답특성비교

### 2.2. 상태 관측기

상태 관측기가 연구된 배경은 실제적으로 접근하기가 용의하지 않은 시스템이나 제어변수가 명확하지 않은 시스템에서 제어하고자 하는 제어변수를 물리적으로 수학적인 관계가 있는 다른 변수를 이용하여 간접적으로 관측 및 제어를 행하고자 할 필요성 때문에 연구되어 왔다. 상태관측기의 종류로는 다음과 같은 종류가 있다.

- o 전 차원관측기
- o 최소차원 관측기
- o 슬라이딩 모드 관측기
- o 칼만 필터를 이용한 관측기

이중 최소차원 관측기는 전차원 관측기가 가지는 복잡한 계산량을 줄이기 위한 관측기이며 슬라이딩 모드 관측기는 실제의 시스템파라미터와 관측기파라미터사이의 모델링 오차와 측정잡음을 ON-OFF제어기를 이용하여 제거해주는 관측기이다. 또한 칼만 필터를 이용한 관측기는 시스템과 관측기사이에 존재하는 모델링오차와 측정잡음을 고려하여 최적의 관측기 이득을 결정해주는 관측기이다. 그러나 이러한 관측기들도 어느정도 시스템의 파라미터변동에 강인한 것이지 근본적인 해결책은 제시하지 못하고 있다. 관측기를 이해하기 위해서 전차원 관측기를 이용한 시스템그리고 관측기모델을 해보기로 하자. 실제 측정된 신호와 간접적으로 추정된 신호의 오차를 입력으로하여 시스템의 상태변수를 추정하는 관측기로서 수학적인 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - C\hat{x}) \quad (5)$$

여기서  $\hat{x}$ 는  $x$ 의 추정치

$G$ 는 오차를 보정하는 이득 행렬

식(4)에서 식(5)를 빼면 다음과 같은 상태 관측기의 오차 방정식이 나타난다.

$$\dot{e} = (A - GC)e \quad (6)$$

여기서,  $e = x - \hat{x}$

식(4), (5)와 같은 시스템이 가관측 시스템이라면, 식(6)의 극점을 원하는 응답을 주는 곳에 배치할 수 있다. 그러나 식(6)에서 보는 바와 같이 관측기 시스템의 성능을 좌우하는 것은 실제의 시스템의 파라미터와 관측기의 파라미터가 같아야한다는 조건이 관측기를 시스템에 적용하는데 전제조건이 된다.

### 4-3. 관성(Inertia)제어기에 관한 고찰

일반적으로 관측기를 가지고 있는 시스템은 시스템응답이 관측기의 파라미터에 의해서 동작한다. 만약 관측기의 파라미터가 실제 파라미터보다 큰 경우에는 실제 시스템과 관측기 시스템의 오차가

(-)방향으로 발생함으로 전체 시스템의 응답이 느려지는 결점이 있으나 시스템의 안정도에는 별영향이 없다. 그러나 만약 관측기의 파라미터가 실제의 파라미터 보다 작은 경우에는 실제 시스템과 관측기 시스템의 오차가 (+)방향으로 발생함으로 전체 시스템의 응답이 빨라지기는 하나 오차율이 50%를 넘어서면 시스템이 발산하게 된다. 이러한 점이 관측기가 가지고 있는 가장 큰 취약점이라 할 수 있다. 본 논문에서 이러한 점 때문에 관측기 뒷단에 관성 제어기를 부착하여 시스템의 안정성과 속응성을 갖도록 하였다. 관성제어기의 모델링은 다음과 같다. 관측기가 없는 경우의 시스템 상태 방정식은 식 (7)과 같다.

$$\omega_r = \frac{1}{J_s} (K_T * I_{qs1} - T_L) \quad (4.35)$$

그러나 그림 4와 같이 관측기에 기반을 둔 관성제어기를 부착할 경우에는 식(8)이 된다.

$$\omega_r = \frac{1}{J_{ns}} (K_T * I_{qse} - T_L) \quad (4.36)$$

여기서,  $I_{qs1} = I_{qse} + I_{qsp}$

$$I_{qsp} = \frac{(J - J_n)}{J_n} (I_{qse} - \frac{(K_T * I_{qs1} - J_s \omega_r)}{K_T})$$

$$I_{qs1} = I_{qse} + \frac{(J - J_n) s \omega_r}{K_T}$$

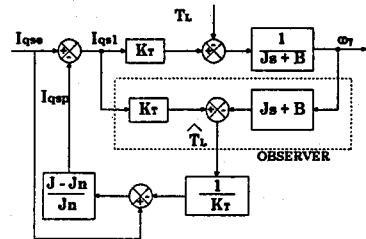
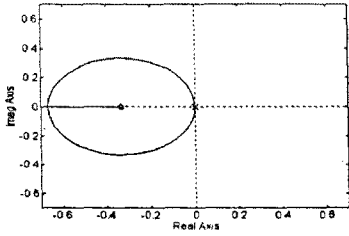
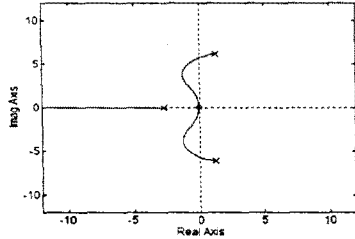


그림 4 관성 제어기

그림 4는 관성 제어기를 관측기의 뒷단에 부착하였을 때와 부착 하지 않았을 경우의 관성의 변화에 따른 루트 로커스의 파형을 각각 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 관성 제어기를 부착한 경우에 있어서는 관성  $J$ 가 어떤값을 가지더라도 안정한 시스템임을 알 수 있으나 관성 제어기가 없는 경우 어느 특정한 영역에서 Root Locus의 근이 우반평면에 위치하게 됨으로써 시스템의 안정도를 전영역에서 보장할 수가 없게 된다. 따라서 관측기 시스템에서 이러한 관성 제어기의 역할은 점점 더 필요성을 얻게 될 것이다.



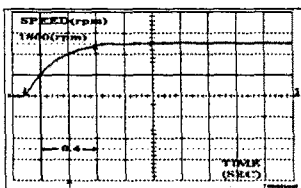
(a) 관성제어기를 가진 시스템에서 시스템의 관성 변화에 따른 루트 로커스



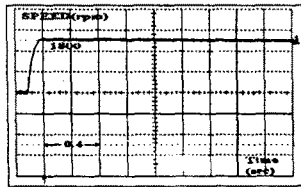
(b) 관성제어기를 갖지 않은 시스템에서 시스템의 관성변화에 따른 루트 로커스

그림 5 속도 전달함수의 루트 로커스

그림6은 관성제어기를 이용해서 관성 파라미터를 제어한 실험 결과를 보여 주고 있다. 그림6의 파형은 유도기에 적용한 실험 파형이나 직류기나 동기기에 적용했을경우에도 같은 결과를 나타낼것으로 생각 된다.



a)



(b)

그림 6 파라미터제어기를 이용한 시스템의 관성파라미터제어파형

( (a)  $J_n = 2J$  (b)  $J_n = 0.5J$  ).

### 3. 결 론

시스템에 제어이론을 적용하려는 경우에 있어서 제어이론에 대한 가격함수를 토출하여 제어기를 선

택하고 관측기를 이용한 강인한 제어기를 설계하려 할 때 파라미터의 변동이 전영역에서 안정한 관측기 설계에 대하여 알아 보았다. 이상에서 논한 내용은 실제 산업현장에서도 조금이라도 도움이 되리라 기대해 본다.

### (참 고 문 헌)

- [1] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, pp.237-251
- [2] B. D Yoon, Y. H Kim, C. K Kim, "Robust Speed Control of Induction Motor Using Fuzzy Sliding Adaptive Controller with Sliding Mode State Observer", IECON, IEEE Conf., florida, U.S.A, 1995, pp.87-pp.92.