

방사형 기저 함수망 외란관측기를 이용한 서보시스템의 저속응답 성능개선

李敎範[†], 柳志潤^{*}

Performance Improvement of Servo System in the Low Speed Operation Region Using RBFN Disturbance Observer

Kyo-Beum Lee and Ji-Yoon Yoo

요 약

본 논문에서는 극저속 영역에서 서보 전동기 구동 장치의 관성을 추정하는 기법을 제안한다. 대개의 서보 시스템에서 저속 영역의 성능 향상을 위해 사용되는 순시 속도 관측기는 관성계수와 같은 기계계 파라미터의 변동에 민감하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 방사형 기저 함수망(Radial Basis Function Networks)을 이용하는 전동기 관성을 추정기법을 제안한다. 실험을 통하여 제안한 추정기법의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

A new scheme to estimate the moment of inertia in the servo motor drive system in very low speed is proposed in this paper. The typical speed estimation scheme in most servo system for low speed operation is sensitive to the variation of machine parameters, especially the moment of inertia. To estimate the motor inertia value, the observer using the Radial Basis Function Networks(RBFN) is applied. The effectiveness of the proposed inertia estimation method is verified by experiments. It is concluded that the speed control performance in the low speed region is improved with the proposed disturbance observer using RBFN.

Key Words : Servo system, disturbance observer, radial basis function networks

1. 서 론

대부분의 서보 시스템에서 전동기의 속도는 회전축에 부착되어 있는 증분형 엔코더의 출력 펄스 신호로부터 검출하고, 보통 M/T 방식을 혼용해서 사용한다. M/T 방식은 엔코더 출력펄스신호로부터 트리거 시점을 기준으로 일정시간마다 엔코더 펄스의 주파수를 측

정하여 전동기의 회전속도를 계산하는 방식으로 비교적 정확하게 전동기의 회전속도를 측정할 수 있다. 전동기의 운전 영역이 저속으로 내려갈 경우, 엔코더의 출력펄스주기가 제어주기보다 점점 더 커지게 되어 속도 제어 성능이 나빠지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 형태의 순시 속도 관측기가 제안되었다^[1-4]. 제안된 대부분의 순시 속도 관측기는 전동기의 운동방정식으로부터 유도된 것으로 운동계 파라미터, 특히 관성계수에 민감하게 된다. 관성계수는 부하의 변동이나 속도지령값의 변화에 따라 다르게 관측되기 때문에, 고정밀 응답특성이 요구되어지는 서보 시스템에서는 이와 같은 운동계 파라미터의 변동, 특히 관

[†]교신저자 : 정희원, Institute of Energy Technology, Aalborg University(Post Doc.)

E-mail : kyl@iet.auc.dk

정희원, 고려대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 2004. 5. 21 1차 심사 : 2004. 8. 9

심사완료 : 2004. 8. 13

성계수 변동에 강인한 제어를 설계해 주어야만 한다.

관성계수와 부하외란을 동시에 추정하기 위해 LSM (Least Square Method)를 이용한 적응제어기법이 제안되었다^[5]. 제안된 기법은 관성계수와 부하외란이 동시에 변동할 때 속도 지령값을 변동해 주어야 하는 단점이 있다. 위의 방식과는 달리 관성 계수를 동시에 추정하지 않는 몇가지 방식들이 제안되었는데, Kalman Filter, RELS(Recursive Extended Least Square)를 적용한 관성 계수 추정 기법들이 있다^[6-7]. 제안된 기법들은 매 제어주기마다 복잡한 계산을 통하여 이득이 설정되고 관성이 추정되기 때문에 다소 복잡한 단점이 있다. 본 논문의 저자에 의해 축소차원 확장 루엔버거 관측기(ROELO)를 이용한 관성 추정기가 제안되었다^[4]. 제안된 관성추정 기법은 계산이 복잡하지 않아 실제 시스템에 적용이 용이하다는 장점이 있으나 마찰계수의 변동에 민감하다.

본 논문에서는 방사형 기저 함수망(Radial Basis Function Network, RBFN)을 이용한 관성계수 변동 및 부하외란의 추정기를 제안한다. 방사형 기저 함수망은 간단한 구조에도 불구하고 비선형 시스템에 대해 적절한 모델링이 가능하다는 특징으로 인해 비선형 제어기 설계분야에서 universal approximator로 널리 사용되어 왔다^[8]. 관성계수의 변동과 부하외란을 방사형 기저 함수망으로 모델링하고, 모델링 오차를 보상하기 위한 보상신호를 추가한다. 본 논문에서 제안하는 서보 시스템은 간단한 구조의 방사형 기저 함수망을 적용하여 관성계수 변동 및 부하외란을 추정할 수 있도록 하였다. Lyapunov 관점에서 전체 시스템이 안정하도록 추정 입력과 방사형 기저 함수망의 학습을 위한 적응법칙을 설정하였다^[9].

본 논문은 다음과 같이 순서로 서술되어 있다. 처음 부분에는 기존의 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성추정기법을 설명하고 시뮬레이션을 통하여 마찰계수 변동에 따른 문제점을 보인다. 그 다음으로 방사형 기저 함수망에 관해 간단히 서술하고 이를 이용한 외란관측기를 설계한다. 관성계수 및 마찰계수의 변동에 따른 제안한 방사형 기저 함수망 외란관측기의 강인성을 실험을 통하여 검증한다.

2. 축소 차원 확장 루엔버거 관측기 (Reduced Order Extended Luenberger Observer, ROELO)를 이용한 관성 추정

축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 전동기 관

성의 추정은 전 샘플링 시간에서 전차원 관측기로 추정된 부하외란성분을 기반으로 추정한다. 관성추정기의 동작을 순서대로 살펴보면 관성계수를 상수로 가정하고 부하외란과 속도를 추정한 후, 앞서 추정한 부하외란 값을 이용하여 관성계수를 추정한다. 그림 1은 전차원 관측기를 이용한 순시속도 관측기와 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성 추정기법을 나타낸다. 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용하여 간단한 산술식으로 관성의 변동을 추정할 수 있다.

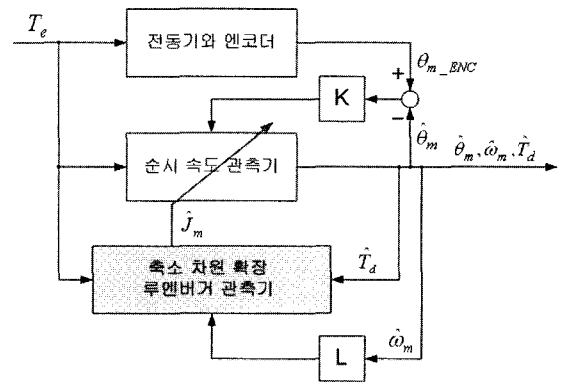


그림 1 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성 추정 기법의 블록도

Fig. 1 Overall block diagram using ROELO

2.1 기계계 시스템의 모델링과 전차원 순시 속도 관측기

전동기에 엔코더를 부착한 운동계의 모델링은 그림 2와 같이 표현된다. 엔코더 부를 제외한 전동기에 해당하는 부분은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

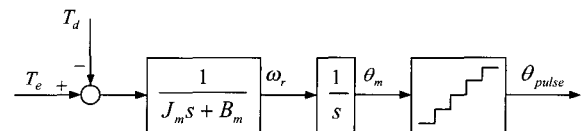


그림 2 엔코더가 사용된 서보 전동기 시스템의 동적 모델링
Fig. 2 Dynamic model of mechanical system for a servo drive using an encoder

$$T_e = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_d \quad (1)$$

여기서, w_m 은 회전자 속도, J_m 은 관성 모멘트, B_m 은 마찰계수, T_e 는 구동토크, T_d 는 부하외란을 나타낸다.

증가형 엔코더는 실제로 위치검출기이므로 운동계 출력은 위치 정보이고 회전자의 속도는 회전자의 위치의 차이로부터 계산된다. 따라서 운동계의 출력인 위치로부터 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = w_m \quad (2)$$

여기서 θ_m 은 각위치를 나타낸다.

외란 변화는 제어기의 제어 샘플링 주기에 비해 상당히 낮으므로 부하외란의 변화율은 0이라 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이 외란을 상태변수로 도입할 수 있다.

$$\frac{dT_d}{dt} = 0 \quad (3)$$

식 (1)-(3)으로부터 그림 1의 운동계 시스템의 상태 방정식은 다음과 같게 된다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], \quad x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ w_m \\ T_d \end{bmatrix}, \quad y = \theta_m, \quad u = T_e.$$

본 논문에서는 순시속도를 추정하기 위해서 식 (5)와 같이 앞 절에서 살펴본 운동계 시스템 모델링을 기반으로 한 전차원 관측기를 적용한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\theta}}_m \\ \dot{\hat{w}}_m \\ \dot{\hat{T}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{w}_m \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + K \left(\theta_m - [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{w}_m \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

여기서 K 는 관측기 이득행렬이다.

관측기 이득행렬 K 는 극점배치기법을 사용하여 결정한다. 만약 추정기 오차의 근을 $s = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 에 위치시키고 싶다면 추정기의 특성방정식은 다음과 같이 된다.

$$(s - \alpha_1)(s - \alpha_2)(s - \alpha_3) = 0 \quad (6)$$

식 (6)의 계수와 식 (5)의 특성방정식인 식 (7)과 계수를 비교함으로써 관측기 이득 행렬 K 를 선정할 수 있다.

$$\det[sI - (A - KC)] = s^3 + \frac{k_1 J_m + B_m}{J_m} s^2 + \frac{k_2 J_m + k_1 B_m}{J_m} s - \frac{k_3}{J_m} = 0 \quad (7)$$

2.2 축소자원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성 추정기 설계

정확한 관성계수를 알지 못하는 경우에 외란으로 그 영향이 나타난다. 전차원 관측기에서 알고 있는 관성계수를 J_{obs} 이라 하고 실제 전동기의 관성계수를 J_m , 그 차이를 ΔJ_m 이라 하면 $J_m = J_{obs} + \Delta J_m$ 의 관계를 갖게 된다. 이를 전동기 시스템 모델링 식인 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_d \quad (8)$$

$$= J_{obs} \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_{d.obs}$$

여기서 $T_{d.obs} = T_d + \Delta J_m \frac{dw_m}{dt}$ 이다.

식 (8)에서 보면 모델링의 오차가 부하외란과 같이 나타나기 때문에 관성계수와 부하외란을 같은 시스템의 식에서 추정하게 되면 추정된 외란에 관성의 오차가 포함되어 있게 되어 부하외란의 정확한 추정이 어렵게 될 뿐 아니라 추정된 외란 중에 어느 정도가 관성계수의 오차인지 알 수가 없게 된다. 식 (5)으로 표현된 3차의 시스템 방정식에 식 (9)의 관성계수를 상태변수로 도입하여 부하외란과 관성계수를 동시에 표현하는 4차의 시스템 상태방정식을 만들 수 있다. 이와 같은 하나의 시스템에서 관성계수와 부하외란을 동

시에 추정할 경우 식 (8)에서 본 바와 같이 추정기의 수렴성 및 각각의 추정성능을 보장 할 수 없다. 따라서 전동기의 관성계수를 알고 있다는 가정 하에 전차원 관측기를 이용한 순시속도 추정기를 구성하여 속도 및 외란을 추정하고, 관성을 추정하기 위한 시스템에서는 순시속도 추정기의 출력값인 속도, 부하외란을 입력으로 하여 관성만을 추정하도록 설계한다. 전동기 변수의 불확실성과 부하외란이 동시에 존재하더라도 총체적 외란관측 및 보상을 통해 우수한 속도응답을 기대할 수 있고 특히 마찰계수의 값이 정확하고 부하외란이 영일 때는 실제에 가까운 관성을 추정할 수 있는 장점이 있다

관성계수가 제어기 샘플링 주기에 비해 느리게 변화한다고 가정하면 다음과 같이 상태변수로 도입할 수 있다.

$$\frac{dJ_m}{dt} = 0 \tag{9}$$

식 (1)의 전동기 모델식과 식 (9)의 미분방정식을 이용하여 관성을 추정하기 위한 시스템을 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x) + Hu, \quad y = Gx \tag{10}$$

$$\text{여기서 } x = \begin{bmatrix} \hat{w}_m \\ J_m \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} \hat{w}_m - \frac{1}{J_m} \hat{T}_d \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G = |1 \ 0|, \quad y = \hat{w}_m, \quad u = T_e.$$

식 (10)의 시스템 방정식은 비선형이므로 해석 및 설계의 편의를 위하여 자코비안 선형화 기법을 이용하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + Hu \approx f(\bar{x}) + \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + Hu \\ &= \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} x + Hu + f(\bar{x}) - \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} \bar{x} \\ &= A(\bar{x})x + Hu + h(\bar{x}) \end{aligned} \tag{11}$$

여기서

$$A(\bar{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m^2} (T_e - B_m \hat{w}_m - \hat{T}_d) \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$h(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{J_m} T_e - \frac{B_m}{J_m} \hat{w}_m - \frac{2}{J_m} \hat{T}_d \\ 0 \end{bmatrix},$$

\bar{x} 는 Δt 시간 전의 상태값 $x(t - \Delta t)$ 를 나타낸다.

자코비안 선형화 기법을 이용하여 선형화된 시스템 방정식인 식 (11)은 한 제어 샘플링 주기 동안은 선형 시불변 시스템이라 볼 수 있으므로, 전 샘플링 주기의 값을 이용해서 다음 샘플링 주기에 모르는 상태를 추정하는 식 (12)와 같이 전차원 확장 루엔버거 관측기를 설계한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= A(\bar{x})\hat{x}(t) + Hu(t) + h(\bar{x}) \\ &\quad + L\{y(t) - C\hat{x}(t)\} \\ &= \{A(\bar{x}) - LC\}\hat{x}(t) + Hu(t) + Ly(t) + h(\bar{x}) \end{aligned} \tag{12}$$

상태 변수 소거법을 이용하여 시스템의 차수를 축소하고, 마이크로프로세서를 이용하여 구현하기 위해 이산화된 형태로 변환하면 전동기의 관성계수는 순시속도 추정기에서 구해진 값을 이용하여 간단한 산술식으로 구해진다^[4].

$$\begin{aligned} z_k &= z_{k-1} + t_{sp} \left[-\left(\frac{LB_m \hat{w}_m}{J_{m,k-1}} - \frac{L\hat{T}_d}{J_{m,k-1}^2} \right) z_{k-1} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ -\frac{L^2(B_m \hat{w}_m + \hat{T}_d)}{J_{m,k-1}^2} + \frac{LB_m}{J_{m,k-1}} \right\} \hat{w}_m \right. \\ &\quad \left. - \frac{L}{J_{m,k-1}} (T_e - B_m \hat{w}_m - 2\hat{T}_d) \right] \end{aligned} \tag{13}$$

$$J_{m,k} = z_k + L\hat{w}_m \tag{14}$$

여기서 t_{sp} 는 제어기의 샘플링 시간을 나타낸다.

식 (14)에서 보면, 제안한 관성추정기법은 마찰계수와 추정된 부하외란에 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 마찰계수가 정상상태의 20%가 되었을 때, 순시속도 추정기 및 관성 추정기의 성능을 살펴보기 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 시뮬레이션에 사용된 매입형 영구자석 동기전동기의 정격 및 전체 제어 시스템의 구성은 4장에서 언급할

것이다. 시뮬레이션 결과를 통하여 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성추정기법이 계산이 간단하여 적용이 용이하지만 파라미터 변동에 민감하다는 단점이 있고 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 수행되어야 함을 알 수 있다. 본 논문에서는 방사형 기저 함수망 외란관측기를 이용하여 이러한 문제점을 해결하고자 한다.

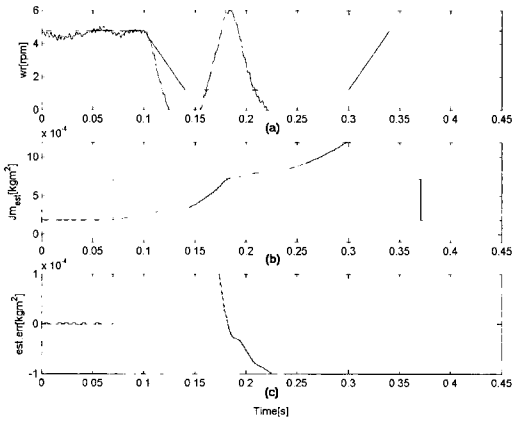


그림 3 축소차원 확장 루엔버거 관측기를 이용한 관성추정기에서 마찰계수의 변동에 따른 응답 특성 (20%) (a) 속도 지령값과 실제 속도, (b) 실제 관성계수 값과 추정 관성계수 값, (c) 추정 오차

Fig. 3 The friction coefficient variation response (20% of nominal value) in the ROELO inertia identification (a) reference and real speed, (b) real and estimated inertia value, (c) estimation error

3. 방사형 기저 함수망 (Radial Basis Function Networks) 외란관측기

3.1 방사형 기저 함수망 (Radial Basis Function Networks)

본 논문에서는 전동기 파라미터 변동에 따른 순시속도 추정기의 응답 특성을 향상시키기 위해 그림 4와 같이 입력층(input layer)과 출력층(output layer), 가우시안과 같은 방사형 기저 함수를 활성 함수로 갖는 뉴런으로 이루어진 은닉층(hidden layer)으로 구성되어 있는 방사형 기저 함수망 (Radial Basis Function Network, RBFN)을 적용하였다. 식 (15)는 본 논문에서 은닉층의 활성함수로 사용된 가우시안 함수를 나타낸다. 각 뉴런이 가지는 방사형 기저 함수의 중심은 그 뉴런이 갖는 연결 강도에 의해 결정되고, 그 위치와 함수의 폭은 학습을 통해 구한다. 출력은 식 (16)과 같이 모든 방사형 기저 함수 출력의 선형조합으로 결

정된다. 함수 근사의 관점에서 보면, 은닉층은 입력 패턴을 표현하기 위한 기저(basis)를 형성한다고 할 수 있다.

$$z_q = \xi_q(x) \equiv \frac{\phi_q(x)}{\sum_k \phi_k(x)} = \frac{\exp\{-|x - m_q|^2/2\sigma_q^2\}}{\sum_k \exp\{-|x - m_k|^2/2\sigma_k^2\}} \quad (15)$$

여기서 x 는 입력 벡터, m_q 는 중심, σ_q 는 q 번째 가우스 여자 함수의 폭을 나타낸다.

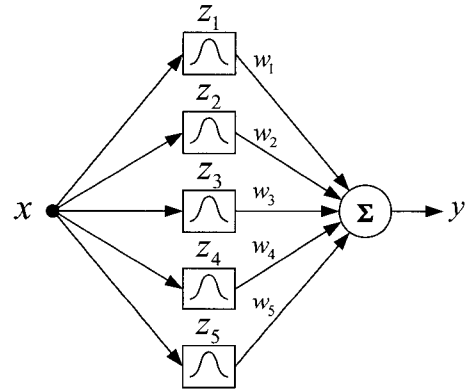


그림 4 본 논문에 적용된 방사형 기저 함수망의 구조 Fig. 4 Structure of the used radial basis function networks

$$y = \sum_{q=1}^l w_q \cdot z_q = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_l] [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_l]^T = W^T \cdot Z \quad (16)$$

여기서 w_i , ($i = 1, \dots, l$)는 i 번째 출력단과 방사형 기저 함수망의 출력 사이의 연결강도를 나타내고, $W \in R^n$ 는 w_i 의 벡터를 나타낸다.

3.2 방사형 기저 함수망을 이용한 외란관측기의 설계

파라미터의 변동과 외란의 영향을 고려하면 식 (4)의 시스템 방정식은 순시속도 관측기의 속도추정을 포함하여 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}_q = A_n \hat{x}_q + B_n u_o + \epsilon \quad (17)$$

여기서 $\hat{x}_q = \hat{w}_r$, $A_n = -\frac{B_m}{J_m}$, $B_n = \frac{1}{J_m}$,
 $u_o = T_e$, $\epsilon = (\Delta A_n \hat{x}_p + \Delta B_n u_o + C_n T_d + \rho)$,
 $C_n = -\frac{1}{J_m}$, ΔA_n , ΔB_n 은 A_n , B_n 의 파라미터 변
 동, ρ 는 unmodeled uncertainties를 나타낸다.

고성능의 서보 시스템 설계를 위해서는 식 (17)의
 순시 속도 추정의 오차와 모델링 오차, unmodeled
 uncertainties가 포함된 외란 ϵ 을 보상해주어야 한다.
 본 논문에서는 앞서 언급한 방사형 기저 함수망을 이
 용하여 모델링하여 보상한다.

다음의 부등식이 성립한다고 가정하자.

$$\zeta(t) \leq \zeta^*$$

여기서 $\zeta(t) = \epsilon^* - \epsilon$, ϵ^* 은 최적화된 총 외란을
 나타내고, ζ^* 는 0보다 큰 작은 상수를 나타낸다.

만약 외란 ϵ 을 알 수 있어 정확히 모델링이 가능하
 다면, 점근적으로 안정한 페루프 제어시스템의 제어
 입력은 식 (17)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_o = B_n^{-1} [\dot{x}_d - A_n x_q - \epsilon + K_x e_x] \quad (18)$$

여기서 $e_x = x_d - \hat{x}_q$, $x_d = w_r^*$, K_x 는 설계 상수
 를 나타낸다.

앞서 식 (18)에서 정확히 모델링이 가능하다고 가정
 한 외란 ϵ 을 방사형 기저 함수망을 이용하여 모델링
 하고, 방사형 기저 함수에서 학습을 통해 설정해 주어
 야 하는 파라미터들을 적응 법칙을 이용하여 전체 시
 스템이 안정하도록 정한다. 식 (17)은 방사형 기저 함
 수망의 출력 $\hat{\epsilon}$ 을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수
 있다.

$$u_n = B_n^{-1} [\dot{x}_d - A_n x_q - \hat{\epsilon} + K_x e_x] \quad (19)$$

방사형 기저 함수망 외란관측기가 외란을 완벽하게
 추정하여, $\hat{\epsilon}(t) = \epsilon(t)$, $\forall t \geq 0$ 의 조건이 만족한다
 면, 전체 시스템의 점근적인 안정도를 보일 수 있다.
 그러나 실제 시스템에서는 방사형 기저 함수망으로 시
 스템 외란을 나타낼 때 모델링 오차가 발생하게 되고,
 이것을 보상하기 위한 추가 제어입력이 필요하게 된
 다. 다음 식 (20)에서처럼 추가 제어입력신호 u_p 를 첨

가하여 전체 제어입력은 u_q 가 되도록 설계한다^[9].

$$\begin{aligned} u_q &= u_n + u_p \\ u_p &= B_n^{-1} \zeta \operatorname{sgn}(e_x) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 는 부호 함수를 나타낸다.

방사형 기저 함수망 외란관측기의 설계 파라미터인
 ζ 과 연결 강도 W , 보상 입력 신호 u_p 에 관한 적응
 법칙을 유도하기 위해 다음과 같은 형태의 리아프노프
 함수를 설정한다.

$$\begin{aligned} V_e(t) &= \frac{1}{2} e_x^2 + \frac{1}{2\gamma_W} (W - W^*)^T (W - W^*) \\ &\quad + \frac{1}{2\gamma_\zeta} (\zeta - \zeta^*)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

식 (17)-(19)로부터 시스템의 오차 방정식을 다음과
 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= \dot{x}_d - \dot{x}_q = \dot{x}_d - \{A_n x_q + B_n(u_n + u_p) + \epsilon\} \\ &= \dot{x}_d - [A_n x_q \\ &\quad + B_n \{B_n^{-1}(\dot{x}_d - A_n x_q - \hat{\epsilon} + K_x e_x) + u_p\} + \epsilon] \\ &= -K_x e_x - B_n u_p + \hat{\epsilon} - \epsilon^* + \zeta \\ &= -K_x e_x - B_n u_p + (W - W^*)z + \zeta \end{aligned} \quad (22)$$

식 (21)의 리아프노프 함수의 도함수를 구하면 다음
 과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t) &= e_x \{-K_x e_x - B_n u_p + (W - W^*)^T z + \zeta\} \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_W} (W - W^*)^T \dot{W} + \frac{1}{\gamma_\zeta} (\zeta - \zeta^*) \dot{\zeta} \\ &= -K_x e_x^2 - e_x B_n u_p + e_x (W - W^*)^T z \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_W} (W - W^*)^T \dot{W} + e_x \zeta + \frac{1}{\gamma_\zeta} (\zeta - \zeta^*) \dot{\zeta} \\ &\leq -K_x e_x^2 - e_x B_n u_p + e_x (W - W^*)^T z \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_W} (W - W^*)^T \dot{W} + |e_x| \zeta + \frac{1}{\gamma_\zeta} (\zeta - \zeta^*) \dot{\zeta} \end{aligned} \quad (23)$$

리아프노프 함수의 도함수인 식 (23)이 음의 값을 갖도록 식 (24)와 같이 방사형 기저 함수망의 연결강도 및 파라미터의 갱신법칙을 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{W} &= -\gamma_w e_x z \\ \dot{\zeta} &= \gamma_\zeta |e_x| \end{aligned} \quad (24)$$

식 (20), (24)를 식 (23)에 대입하면, 다음과 같이 리아프노프 함수의 도함수인 식 (23)이 음의 값을 갖게 되어 전체 제어시스템이 안정하게 됨을 알 수 있다.

$$\dot{V}_e(t) \leq -K_e e_x^2 \leq 0 \quad (25)$$

제안하는 방사형 기저 함수망의 제어기 구조는 다음 그림 5와 같다.

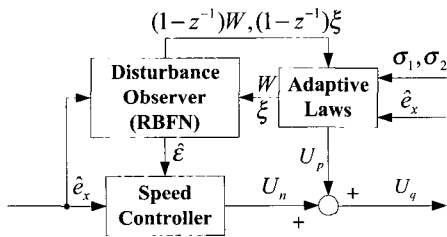
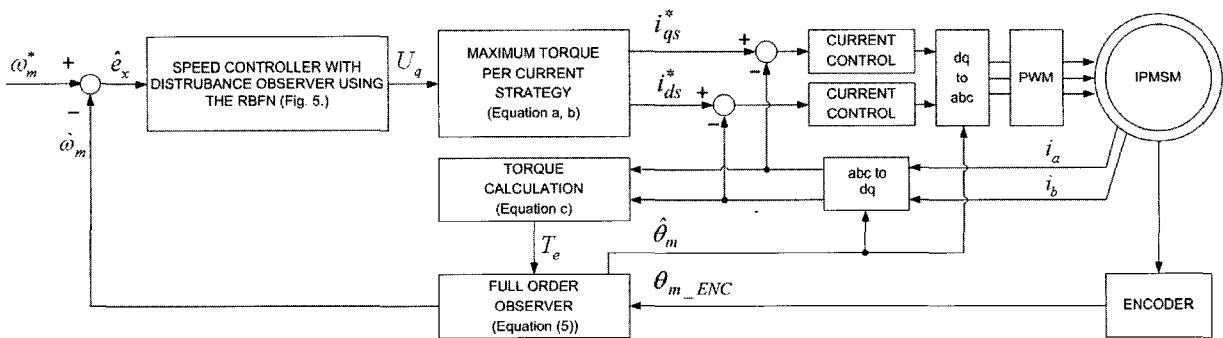


그림 5 제안한 외란관측기의 블록도
Fig. 5 The block diagram of the proposed disturbance observer

제안한 알고리즘을 검증하기 위한 매입형 영구자석 동기전동기를 이용한 서보 시스템의 전류 제어 방식으로 그림 6과 같은 전류당 최대토크 제어기법을 적용하였다^[10]. 매입형 영구자석 동기전동기는 영구 자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 그림 6의 식 c에서 볼 수 있듯이, 자석 토크와 돌극성 ($L_q > L_d$) 때문에 생성되는 자기저항 토크가 발생하게 된다. 매입형 영구자석 동기전동기의 효율적인 운전을 위해서는 두 종류의 발생 토크를 적절히 잘 조절하여 입력 전류에 따른 최대의 토크를 발생할 있도록 제어해 주어야 한다. 그림 6의 a와 b식은 전류당 최대 토크 제어를 위한 d축과 q축 전류 벡터를 나타낸다^[10].

4. 실험

제안한 관측기의 성능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 400W, 220V, 4극, $J_m=0.179 \text{ kgm}^2$, $B_m=0.08 \text{ kgm}^2/\text{s}$, 엔코더 펄스=1024 pulse/rev의 매입형 영구자석 전동기 서보 드라이브 시스템이 실험에 사용되었다. 제안한 알고리즘의 성능을 확인을 위한 실험 장치는 다음 그림 7과 같이 매입형 영구자석 동기전동기, ASIPM을 이용한 전력회로부, TMS320VC33을 이용한 제어부로 구성되어 있다. 속도제어 주기는 $500 \mu\text{s}$ 로 고정하였다.



$$\begin{aligned} \text{Equation a. } i_{ds}^* &= \frac{\lambda_f - \sqrt{\lambda_f^2 + 8(L_q - L_d)^2 U_q^2}}{4(L_q - L_d)} & \text{Equation c. } T_e &= \frac{3P}{2} \{ \lambda_f i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} \} \\ \text{Equation b. } i_{qs}^* &= \text{sgn}(U_q) \sqrt{U_q^2 - i_{ds}^{*2}} \end{aligned}$$

그림 6 전체 서보시스템의 블록도
Fig. 6 The block diagram of the total motor control system

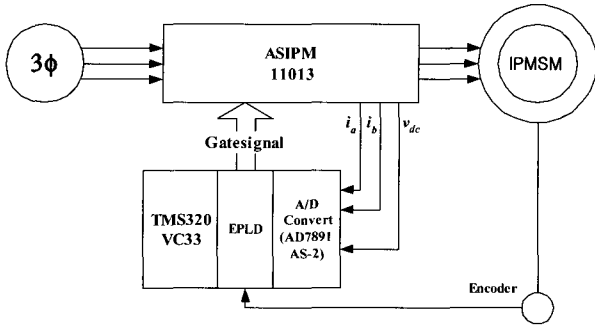
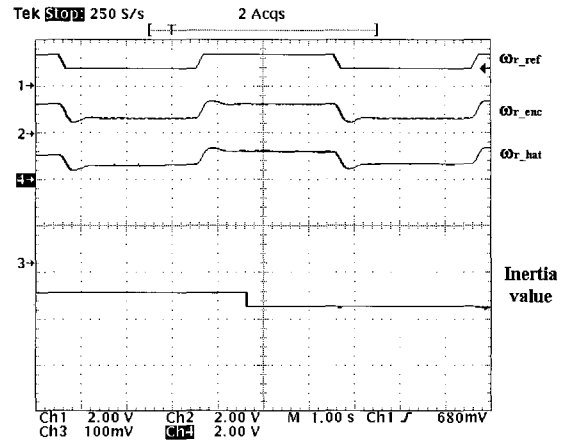


그림 7 실험장치
Fig. 7 Experimental setup.

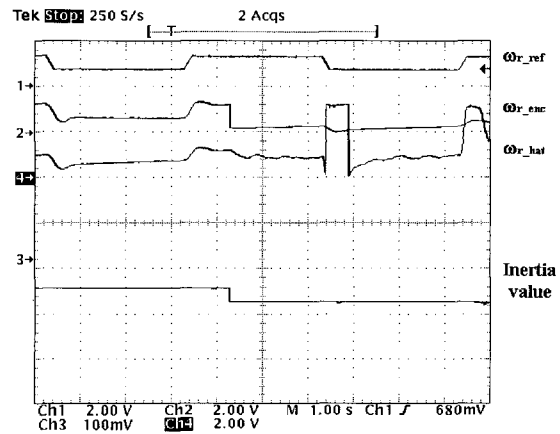
그림 8 - 그림 11은 저속영역에서 시스템 파라미터, J_m 과 B_m 의 변화에 따른 시스템의 응답 특성을 나타낸다. 그림 8과 그림 9는 정격값의 25%가 되도록 관성계수를 변동시키는 조건에서 마찰계수를 각각 정격상태 값의 20%와 500%로 변화시켰을 때 서보시스템의 저속영역에서 속도제어 결과이다. 그림 10과 그림 11은 관성계수를 정격값의 400% 만큼 크게 변동시키는 조건에서 마찰수를 각각 정격상태 값의 20%와 500%로 변화시켰을 때의 속도 응답 특성의 실험결과이다. 속도 지령값은 5rpm에서 2rpm으로 3초를 주기로 변환하였다. 그림 8(a) - 그림 11(a)는 방사형 기저 함수망 외란 관측기를 사용하였을 때의 실험결과이고 그림 8(b) - 그림 11(b)는 축소차원 확장 루엔버거 관성 추정기를 사용할 때의 실험 결과이다. 전차원 순시 속도 관측기의 관성계수 및 마찰계수의 값에 부적절한 값을 대입하여 파라미터의 변동을 나타내었다. 그림 8(b) - 그림 11(b)에서 마찰 계수의 변동에 민감하여 관성계수의 추정 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있으나 제안한 외란관측기를 사용한 그림 8(a) - 그림 11(a)에서는 방사형 기저 함수망의 적절한 외란관측을 통해 마찰계수 변동에 영향을 받지 않고 관성추정을 하여 맥동이 없는 만족할 만한 속도제어 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이 실험결과를 통해 관성계수 및 마찰계수의 변동이 있는 운전환경 하에서도 제안한 관측기를 적용한 시스템은 2rpm의 저속영역의 속도제어가 맥동이 없는 상태로 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저속 영역에서 서보 시스템의 속도 응답 특성을 향상시키기 위한 방사형 기저 함수망 (Radial Basis Function Networks)을 이용한 외란 관



(a)



(b)

그림 8 속도 응답 특성 (파라미터 변동 - $0.25 \cdot J_m$ 와 $0.2 \cdot B_m$, 속도 지령값 - 5 rpm 과 2 rpm으로 변화): 속도 지령값, 엔코더로부터 속도 측정값, 속도 추정값, 외란 (관성계수)

- (a) RBFN 외란관측기를 사용하였을 경우
- (b) ROELO 관성추정기만을 사용하였을 경우

Fig. 8 Speed response (parameter variation $0.25 \cdot J_m$ and $0.2 \cdot B_m$, speed reference variation from 5 rpm to 2 rpm): speed reference, speed from encoder, estimated speed, and disturbance (moment of inertia)

- (a) With the RBFN disturbance observer
- (b) With the ROELO inertia observer.

측기를 제안하였다. 제안한 방사형 기저 함수망 외란 관측기는 파라미터의 변동이나 부하외란을 모델링 함으로써 강인한 서보 시스템의 설계를 가능하게 한다.

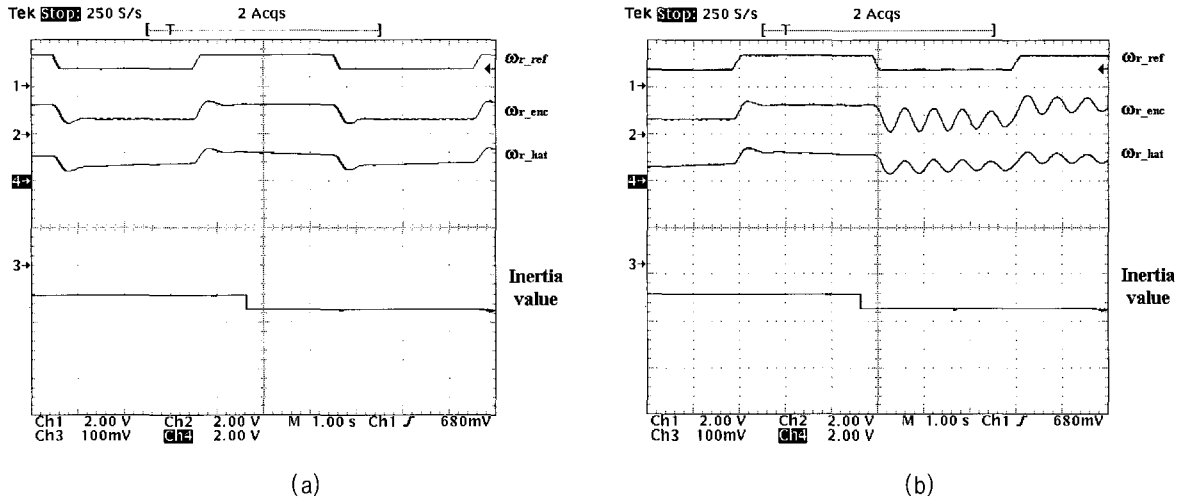


그림 9 속도 응답 특성 (파라미터 변동 - $0.25 \cdot J_m$ 와 $5 \cdot B_m$, 속도 지령값 - 5 rpm 과 2 rpm으로 변화): 속도 지령값, 엔코더로부터 속도 측정값, 속도 추정값, 외란 (관성계수)

(a) RBFN 외란 관측기를 사용하였을 경우 (b) ROELO 관성 추정기만을 사용하였을 경우

Fig. 9 Speed response (parameter variation $0.25 \cdot J_m$ and $5 \cdot B_m$, speed reference variation from 5 rpm to 2 rpm): speed reference, speed from encoder, estimated speed, and disturbance (moment of inertia)
(a) With the RBFN disturbance observer (b) With the ROELO inertia observer

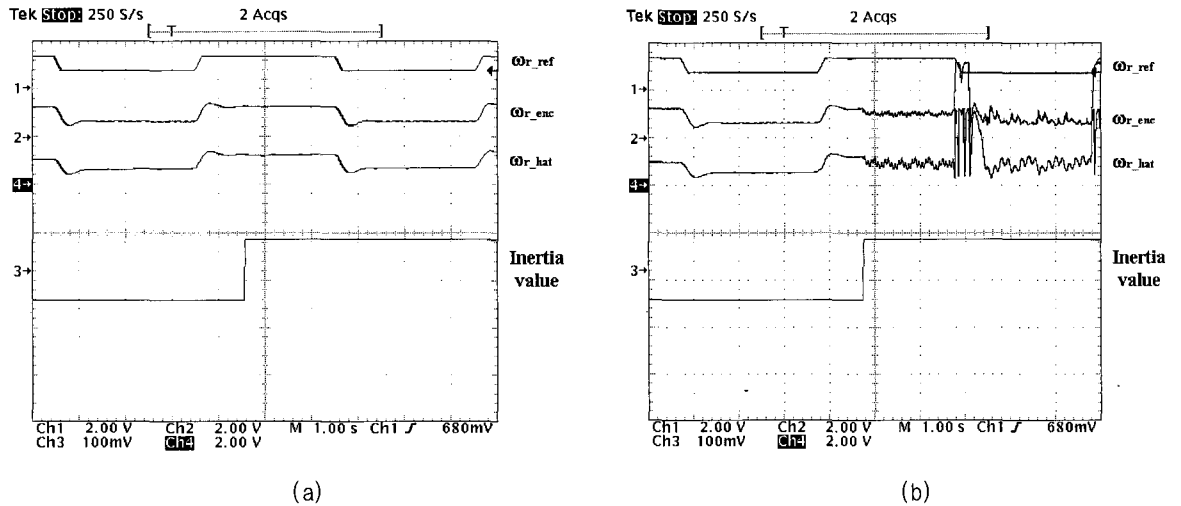
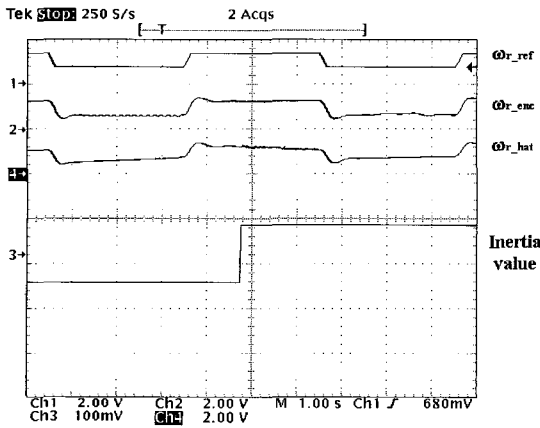


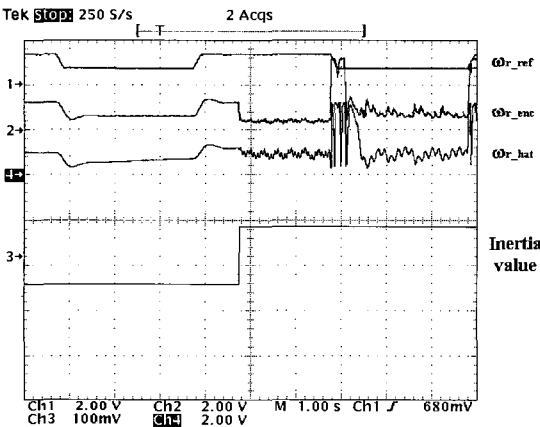
그림 10 속도 응답 특성 (파라미터 변동 - $4 \cdot J_m$ 와 $0.2 \cdot B_m$, 속도 지령값 - 5 rpm 과 2 rpm으로 변화): 속도 지령값, 엔코더로부터 속도 측정값, 속도 추정값, 외란 (관성계수)

(a) RBFN 외란 관측기를 사용하였을 경우 (b) ROELO 관성 추정기만을 사용하였을 경우

Fig. 10 Speed response (parameter variation $4 \cdot J_m$ and $0.2 \cdot B_m$, speed reference variation from 5 rpm to 2 rpm): speed reference, speed from encoder, estimated speed, and disturbance (moment of inertia)
(a) With the RBFN disturbance observer (b) With the ROELO inertia observer



(a)



(b)

그림 11 속도 응답 특성 (파라미터 변동 - $4 \cdot J_m$ 와 $5 \cdot B_m$, 속도 지령값 - 5 rpm 과 2 rpm으로 변화): 속도 지령값, 엔코더로부터 속도 측정값, 속도 추정값, 외란 (관성계수)

- (a) RBFN 외란 관측기를 사용하였을 경우
- (b) ROELO 관성 추정기만을 사용하였을 경우

Fig. 11 Speed response (parameter variation $4 \cdot J_m$ and $5 \cdot B_m$, speed reference variation from 5 rpm to 2 rpm): speed reference, speed from encoder, estimated speed, and disturbance (moment of inertia)

- (a) With the RBFN disturbance observer
- (b) With the ROELO inertia observer.

제안한 관측기는 구조가 비교적 간단하고, 각 설계 파라미터의 제한조건이 없어 설계가 쉬운 장점이 있다. 리아프노프 안정도를 기반으로 방사형 기저 함수망의 파라미터를 갱신함으로써 전체 시스템의 안정도를 증

명한다. 관측된 외란값을 이용하여 순시속도 관측기의 파라미터의 변동을 추정함으로써 서보시스템의 저속 응답특성을 향상시킨다. 실험결과를 통하여 저속영역에서 속도제어의 응답특성이 제안한 외란관측기를 이용한 파라미터 추정을 통해 향상되었음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Yang, and S. J. Ke, "Performance Evaluation of a Velocity observer for Accurate Velocity Estimation of a Servo Motor Drives," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 36, Feb. 2000, pp. 98~104.
- [2] T. J. Kwon, and D. S. Hyun, "High-Performance Speed Control of Electric Machine Using Low-Precision Shaft Encoder," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 14, Sept. 1999, pp. 838~849.
- [3] S. H. Song and S. K. Sul, "An Instantaneous Speed Observer for Low Speed Control of AC Machine," in *Proc. IEEE APEC 1998*, pp. 581~589.
- [4] K. B. Lee, J. Y. Yoo, J. H. Song, and I. Choy, "Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 151, Jan. 2004, pp. 116~120.
- [5] I. Awaya, Y. Kato, I. Miyake, and M. Ito, "New Motion Control with Inertia Identification Function Using Disturbance Observer," in *Proc. IEEE IECON 1992* pp. 77~81.
- [6] N. J. Kim, H. S. Moon, and D. S. Hyun, "Inertia Identification for the Speed Observer of the Low Speed Control of Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, Nov./Dec. 1996, pp. 1371~1379.
- [7] S. J. Hong, H. W. Kim, and S. K. Sul, "A Novel Inertia Identification Method for Speed Control of Electric Machine," in *Proc. IEEE IECON 1996* pp. 1234~1239.
- [8] C. T. Lin and C. S. Lee, *Neural Fuzzy Systems*, Prentice Hall, 1996.
- [9] K. B. Lee, and F. Blaabjerg, "Performance Improvement of Sensorless Vector Control for Induction Motor Drives Fed by Matrix Converter Using Nonlinear Model and Disturbance Observer," in *Proc. IEEE PESC 2004* pp. 1341~1347.
- [10] M. Zordan, P. Vas, P. Rashed, S. Bolognani, and M. Zigliotto, "Field-Weakening in High-Performance PMSM Drives: a Comparative Analysis," *Proc. IEEE IAS 2000*, pp. 1718~1724.

저 자 소 개



이교범(李教範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2003년~현재 Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark(Post Doc.).



유지윤(柳志潤)

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다대 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1991년 창원대 공대 전기공학과 조교수. 현재 고려대 공대 전기공학과 교수.