

# 모델 기준 적응 시스템(MRAS) 부하 토크 관측기를 이용한 유도 전동기의 속도 제어

## Induction Motor Speed Control MRAS-Based Load-Torque Observer

조 문 택\*, 이 충 식\*, 이 세 훈\*

Moon-Taek Cho\*, Chung-Sik Lee\*, Se-Hun Lee\*

### 요 약

본 논문은 유도전동기의 센서리스 속도제어기에 대한 연구이다. 유도전동기의 속도의 제어방법은 자속추정을 위한 기준모델로써 부하-토크 관측기를 이용한 MRAS(Model Reference Adaptive System)를 기초로 하였으며, 전형적인 MRAS 제어기 특성의 속도응답은 부하 토크 외란의 변화에 영향을 미친다. 따라서 제안된 시스템에서의 부하-토크 관측기를 사용한 속도 제어 특성은 부하 토크 외란에 의한 영향을 받지 않는다. 이러한 제어 알고리즘을 MATLAB의 SIMULINK를 통해 전체 시스템을 모델링하여 시뮬레이션 한 결과는 유도 전동기의 다양한 부하 구동 적용에 대한 슬라이딩 속도 제어기의 효과적인 개선이 되었음을 알 수 있었다. 그러므로 이러한 제어 방법들이 산업 응용분야에 확대되어 적용되었으면 한다.

### Abstract

This paper investigates a speed sensorless control of induction motor. The control strategy is based on MRAS (Model Reference Adaptive System) using load-torque observer as a reference model for flux estimation. The speed response of conventional MRAS controller characteristics is affected by variations of load torque disturbance. In the proposed system, the speed control characteristics using a load-torque observer control isn't affected by a load torque disturbance. Control algorithm that propose whole system through MATLAB SIMULINK because do modelling simulation result are presented to prove the effectiveness of the adaptive sliding mode controller for the drive variable load of induction motor. Therefore we hope to be extended in industrial application.

**Keywords** : induction motor, MRAS, speed control, load torque, simulation

## I. 서 론

모델기준적응제어(MRAS)는 센서리스 속도제어 방식 중 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나이다.<sup>[1]</sup> 그러나 종래의 MRAS는 센서리스 벡터제어의 필수정보인 회전자 자속값을 전동기의 전압방정식으로부터 구하는데 있어서 부하변동에 따라 저항변동등 파라미터 변동의 영향이 상대적으로 취약하며, 외부외란이 존재하는 경우 모델과의 완전정합이 되지 않는 문제점이 발생한다.<sup>[2]~[3]</sup>

본 논문에서는 종래의 MRAS의 이러한 단점을 극복하기 위하여 기준모델의 회전자 자속추정을 상태관측기에 의하여 추정하는 방식을 적용한다. 이 방법은 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 Load-Torque Observer로부터 자속 추정이 이루어지고 비교모델에서 회전자의 전류모델을 이용

하여 회전자자속을 측정전류로부터 구하는 방식이다. 즉, 외란을 포함한 부하토크 추정기구와 피드포워드를 조합시킨 제어방식으로써 효과적인 보상을 위해 부하토크추정치에 해당하는 토크전류를 속도제어계의 전류지령치에 가산하는 것에 의해서 최종적인 토크전류 지령을 얻는다. 여기서 monophone을 이용한 경우보다 triphone을 이용한 경우가 좀더 나은 인식성능을 보이고 있다. triphone의 경우 학습 샘플이 부족할 경우 학습이 제대로 수행되지 않아 인식성능을 저하시키지만, 이를 해결하기 위해 state-tying (음소모델의 각 음소의 상태에서 확률값이 유사한 정도에 따라 각 상태의 확률을 서로 공유하는 것)을 이용하고 있다.

## II. 제어기 구성

### 2.1 MRAS 회전자 속도 추정기

그림 1은 종래의 MRAS 회전자 속도추정기의 기본구조를 나타내고 있다. 유도전동기의 고정자측 전압방정식에 의한 기준모델과 회전자측 방정식에 의한 조절모델의 차를

\*대원과학기술대 전기전자과

논문 번호 : 2007-1-9 접수 일자 : 2007. 2. 23

심사 완료 : 2007. 3. 27

적응메카니즘에 적용하여 회전자 추정속도를 발생하는 구조이다.[2]

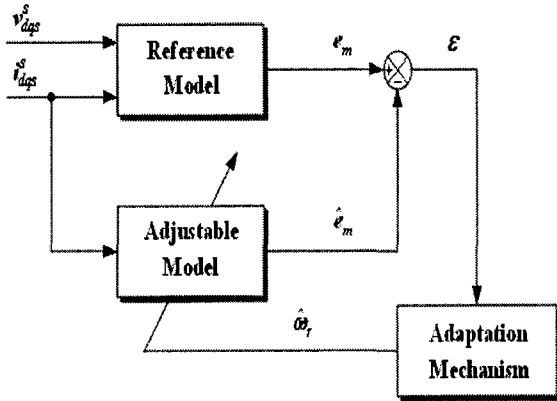


그림 1. 역기전력 기준모델 적응방식의 구조  
Fig. 1. Structure of EMF Reference Model MRAS

### 2.1.1 기준모델의 역기전력 추정

고정자 전류와 전압 값을 입력으로 하는 기준모델의  $d$  축,  $q$  축 역기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{md} &= v_{ds} - (R_s + p\sigma L_s) i_{ds} \\ e_{mq} &= v_{qs} - (R_s + p\sigma L_s) i_{qs} \end{aligned} \quad (1)$$

### 2.1.2 조절모델의 역기전력 추정

적응 메카니즘에 의한 회전자 속도와 고정자 전류를 입력으로 하는 조절모델의  $d$  축,  $q$  축 역기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{e}_{md} &= \frac{L_m^2}{L_r} \left( -\omega_r i_{mq} - \frac{1}{\tau_r} i_{md} + \frac{1}{\tau_r} i_{ds} \right) \\ \hat{e}_{mq} &= \frac{L_m^2}{L_r} \left( \omega_r i_{md} - \frac{1}{\tau_r} i_{mq} + \frac{1}{\tau_r} i_{qs} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

기준모델과 조절모델의 오차를 적응 메카니즘에 적용하면 다음과 같은 속도추정식을 얻게 된다.

$$\hat{\omega}_r = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (e_{mq} \hat{e}_{md} - e_{md} \hat{e}_{mq}) \quad (3)$$

식 (1)~(3)을 이용하여 기준모델과 조절모델을 병렬로 결합시키고, 두 모델의 출력사이에서 발생한 오차 값을 입력으로 하는 적응 메카니즘을 구성한다. 또한 이 출력을 다시 조절모델의 피드백 입력으로 구성하면 역기전력 기준 모델 적응방식을 이용한 회전자 속도추정기는 그림 2와 같이 구현할 수 있게 된다.

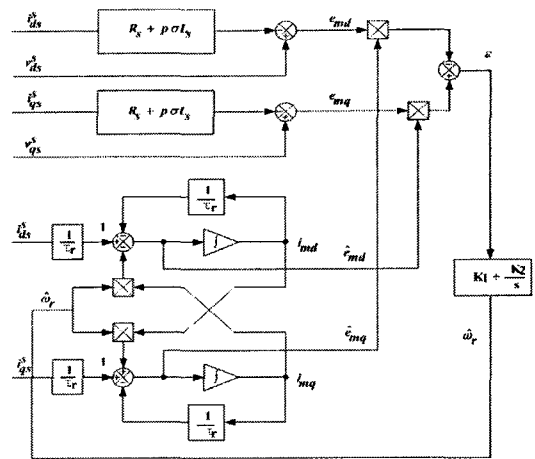


그림 2. 회전자 속도추정기의 블록도  
Fig. 2. Block Diagram of Rotor Speed Estimator

## 2.2 MRAS Based Observer의 구성

기존의 MRAS 회전자 속도 추정기의 단점을 보완하기 위해 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 Load-Torque Observer 로부터 자속추정이 이루어지고 비교모델에서 회전자의 전류모델을 이용하여 회전자자속을 측정전류로부터 구하는 MRAS Based Observer를 구성한다.

고정자 전류와 회전자 자속은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{i}_s^s &= \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} \right) \hat{i}_s^s + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \frac{1}{\tau_r} \lambda_r^s - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} j\omega_r \lambda_r^s + \frac{1}{\sigma L_s} V_s^s \\ \frac{d}{dt} \lambda_r^s &= \frac{L_m}{\tau_r} \hat{i}_s^s - \frac{1}{\tau_r} \lambda_r^s + j\omega_r \lambda_r^s \end{aligned} \quad (4)$$

고정자 전류와 회전자 자속을 추정하는 상태 관측기는 식 (5)와 같은 형식에 의해 식 (6)과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \hat{X} = \hat{A} \hat{X} + B V_s + G (\hat{i}_s - i_s) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^s \\ \hat{i}_{qs}^s \\ \hat{\lambda}_{dr}^s \\ \hat{\lambda}_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{r11} & 0 & a_{r12} & -\hat{a}_{i12} \\ 0 & a_{r11} & \hat{a}_{i12} & a_{r12} \\ a_{r12} & 0 & a_{r22} & \hat{a}_{i22} \\ 0 & a_{r12} & \hat{a}_{i22} & a_{r22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^s \\ \hat{i}_{qs}^s \\ \hat{\lambda}_{dr}^s \\ \hat{\lambda}_{qr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 - g_2 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 - g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^s - i_{ds}^s \\ \hat{i}_{qs}^s - i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5)과 식 (6)으로부터 고정자 전류와 회전자 자속의 추정오차를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} e &= (AX - (A + \Delta A)\hat{X}) - GC(X - \hat{X}) \\ &= (A - GC)e - \Delta A \hat{X} \\ \frac{d}{dt} (X - \hat{X}) &= (AX - \hat{A}\hat{X}) - G(i_s - \hat{i}_s) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$e = X - \hat{X}, \Delta A = \hat{A} - A = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\omega_r J/c \\ 0 & \Delta\omega_r J \end{bmatrix},$$

$$C = [I \ 0], c = \frac{0_{st_r}}{L_m}, \Delta\omega_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$$

식 (7)의 관측기 추정오차방정식을 적응메카니즘에 적용하여 식 (8)과 같은 관측기 속도 추정식을 얻게 된다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(e_{ids}\hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs}\hat{\lambda}_{dr}^s) + K_i \int (e_{ids}\hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs}\hat{\lambda}_{dr}^s) dt \quad (8)$$

여기서,  $e_{ids} = i_{ds}^s - \hat{i}_{ds}^s, e_{iqs} = i_{qs}^s - \hat{i}_{qs}^s$  이다.

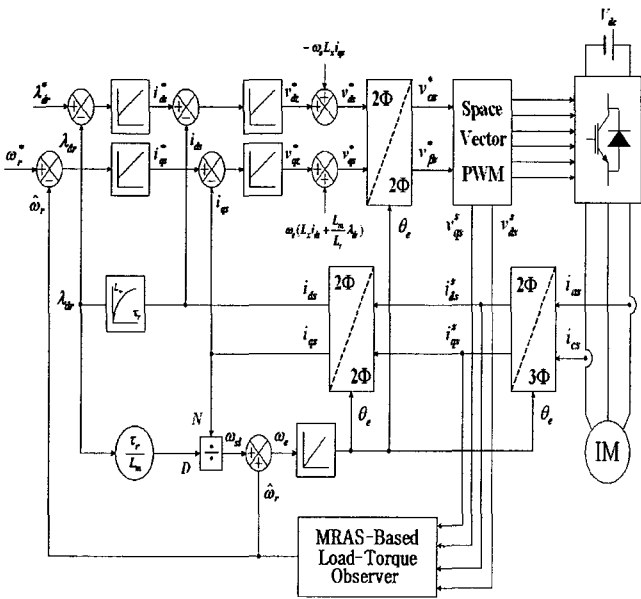


그림 3. 시스템 블록도  
Fig. 3. System Block Diagram

### III. 시뮬레이션

전체시스템의 블록도는 그림 3과 같고 제시한 제어 알고리즘을 MATLAB SIMULINK를 통해 전체 시스템을 모델링하고 역기전력 MRAS속도추정방법에 비해 기준모델에 관측기를 적용한 MRAS Based Observer가 속도 추정 능력이 향상됨을 확인하였으며, 시뮬레이션에 사용한 전동기 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 전동기 파라미터  
Table 1. Motor Parameter

정격 출력, 극수	3.7 [kW] (5HP), 4극
정격 전압, 정격 전류	220 [V], 12.9 [A]
관성 모멘트	0.0918 [kg·m <sup>2</sup> ]
고정자 저항, 회전자 저항	0.6992 [Ω], 0.3552 [Ω]
고정자, 회전자, 상호인덕턴스	0.0661 [H], 0.0632 [H]

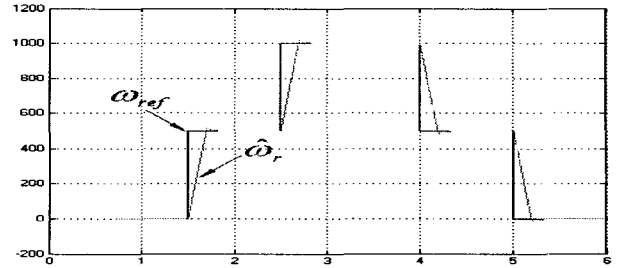


그림 4. 기존의 MRAS 방식의 속도(일정부하시 10%)  
Fig. 4. Before The Speed of MRAS Method

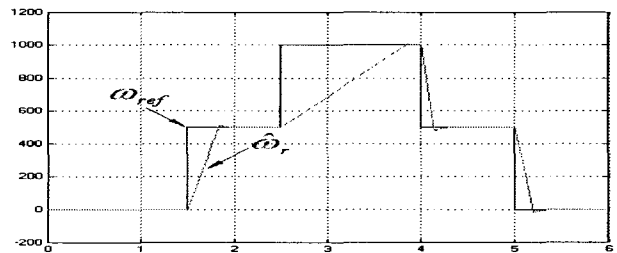


그림 5. 기존의 MRAS 방식의 속도(부하스텝변화시)  
Fig. 5. Before The Speed of MRAS Method

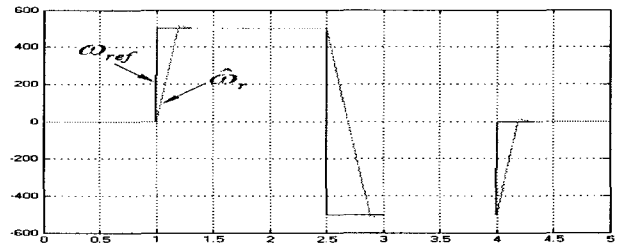


그림 6. 기존의 MRAS 방식의 정역속도(일정부하시 10%)  
Fig. 6. Before The Forward and Reverse Speed of MRAS Method

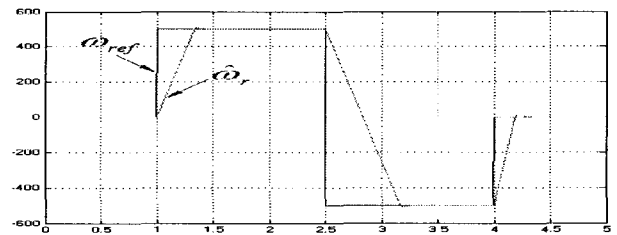


그림 7. 기존의 MRAS 방식의 정역속도(부하스텝변화시)  
Fig. 7. Before The Forward and Reverse Speed of MRAS Method

그림 4와 그림 6은 일정부하시(10%)의 기존 MRAS 방식에 대한 속도응답파형이다. 그림 5와 그림 7은 부하를 스텝변화 시켰을 때의 기존 MRAS 방식의 속도응답파형이다. 일정부하시는 속도추정이 원활하나 부하가변시 기준모델의 파라미터 변화로 인한 지연으로 속도추정이 제대로 이루어지지 않음을 확인할 수 있다.

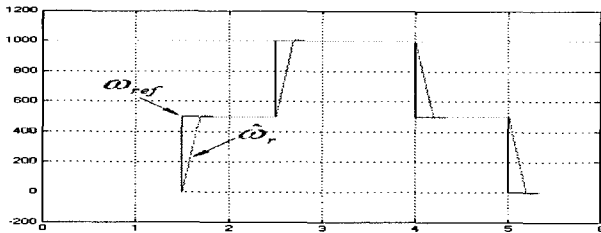


그림 8. MRAS Based Observer의 속도(일정부하시 10%)  
Fig. 8. Speed of MRAS Based Observer

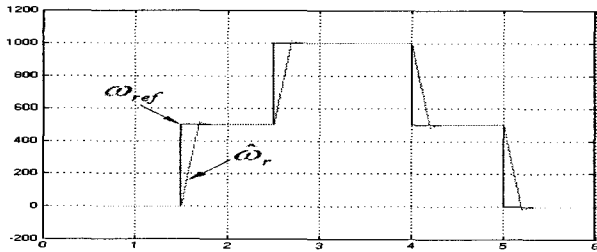


그림 9. MRAS Based Observer의 속도(부하스텝변화시)  
Fig. 9. Speed of MRAS Based Observer

그림 8과 그림 10은 일정부하시(10%)의 MRAS Based Observer에 의한 기준모델 적용시에 대한 속도응답파형이다. 그림 9와 그림 11은 부하를 스텝 변화시켰을 때의 MRAS Based Observer에 의한 기준모델 적용시의 속도 응답파형이다. 일정부하시나 부하가변시 모두 기준모델의 파라미터 변화량을 추정하여 피드포워드 보상함으로써 원활한 속도 추정이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

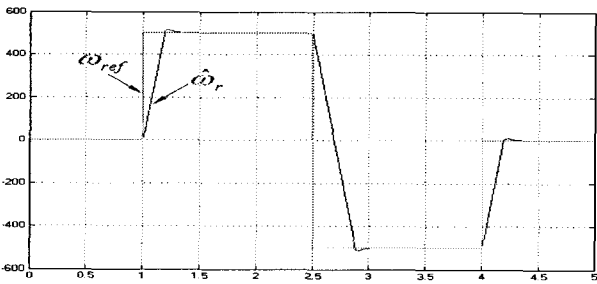


그림 10. MRAS Based Observer의 정역속도(일정부하시 10%)  
Fig. 10. Forward and Reverse Speed of MRAS Based Observer

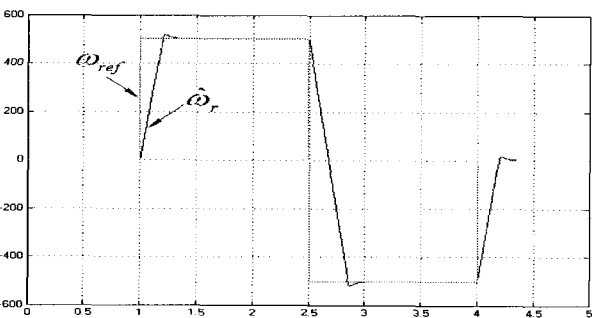


그림 11. MRAS Based Observer의 정역속도(부하스텝변화시)  
Fig. 11. Forward and Reverse Speed of MRAS Based Observer

#### IV. 실험

TMS320VC33을 이용하여 실험을 수행하였으며, 속도가 변은 500rpm~1000rpm으로 가변하였으며, 이때 각 구간에 반부하, 전부하로 부하를 가변하여 실험을 진행하였다. ①은 기준속도, ②는 MRAS Based Observer, ③은 기존의 MRAS의 속도 파형을 나타낸다.

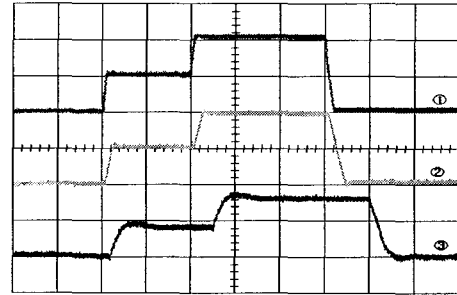


그림 12. 부하가변시 기준속도, MRAS Based Observer, 기존의 MRAS 속도

Fig. 12. Reference Speed at Load Variation, MRAS Based Observer, Before MRAS Speed

#### V. 결론

본 논문에서는 기존의 MRAS 방식에서 부하 변화시 파라미터 변화로 인한 기준모델과 조절모델의 완전 정합이 이루어지지 않아 정확한 속도 추정이 이루어지지 않는 단점을 보완하고자 파라미터 변화시에도 정확한 속도 추정을 이루는 기준모델로 MRAS Based Observer를 사용함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 부하 가변시에도 기존의 MRAS 방식에 비해 약 1/5의 빠른 속도 추정을 확인할 수 있다. (속도가변시 2.5s~4s 구간)
- (2) 정역운전시 기존의 MRAS 방식에 비해 약 1/2의 빠른 속도 추정을 확인할 수 있다. (정역운전시 2.5s~3.5s 구간)

#### 참고 문헌

- [1]S. Tamai, H. Sugimoto and M. Yano, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System",IEEE/IAS, pp.189-195, 1987.
- [2]R. B. Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner and K. J. Bradley, "Dynamic Performance Limitations for MRAS Based Sensorless Induction Motor Drives", IEE Proc B, Vol. 143, No. 2, pp.113-121, 1996.
- [3]I. Miyashita and Y. Ohmari, "A New Speed Observer for an Induction Motor Using the Speed Estimation Technique", IEEE, pp.349-353, 1993.

- [4]K.B.Lee. "Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO"IEE Proc.-Electr. Power Appl.,Vol. 151, No. 1 , January 2004
- [5]M. Tursini, R. Petrella, and F. Parasiliti, "Adaptive sliding mode obserer for speed sensorlees control of induction motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, pp. 1380-1387, Sept./Oct. 2000.
- [6]M. Rodic, K. Jezernic, and A. Sabanovic, "Speed sensorless sliding mode torque control of induction motor," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, vol. 3, 2000, pp. 1820-1827.
- 



조 문 택(Moon-Taek Cho)

1988년 2월 : 명지대 전기공학과(공학사)  
1990년 2월 : 명지대 전기공학과 (공학석사)  
1998년 2월 : 명지대 전기공학과(공학박사)  
2006년 3월 ~ 현재 : 대원과학대학 전기전자과  
부교수

※주관심분야 : 전력변환장치, 대체에너지 시스템 해석



이 충 식(Sik-Chung Lee)

1991년 2월 : 경남대 전기공학과(공학사)  
1993년 2월 : 경남대 전기공학과 (공학석사)  
2000년 2월 : 명지대 전기공학과(공학박사)  
2006년 3월 ~ 현재 : 대원과학대학 전기전자과  
부교수

※주관심분야 : 전력변환장치, 대체에너지 시스템 해석



이 세 훈(Se-Hun Lee)

1982년 2월 : 숭실대 전기공학과(공학사)  
1987년 8월 : 건국대 전자공학과 (공학석사)  
2000년 2월 : 경남대 전기공학과(공학박사)  
2007년 3월 ~ 현재 : 대원과학대학 전기전자과  
교수

※주관심분야 : 전력변환장치, 대체에너지 시스템 해석

---