

직접토크제어 유도전동기의 센서 이상허용 제어

柳志帥, 李起常*

A Fault-Tolerant Scheme for Direct Torque Controlled Induction Motor Drives

Ji-Su Ryu and Kee-Sang Lee

요 약

본 논문에서는 직접토크제어 유도전동기 구동시스템의 고 신뢰성 운전을 위한 센서이상 검출식별 및 이상허용제어에 관한 실험적 연구 결과를 기술한다. 주요 내용은 센서이상 해석 결과의 실험적 검증과 이상검출식별 시스템의 설계, 이상허용제어기의 구현 및 실험적 성능 고찰이다. 적용된 센서이상 검출식별기법은 관측기 기반 기법이며 기존의 다중 관측기 기법과 달리 한 개의 관측기에 의해 검출식별정보를 발생하므로 실시간 적용이 용이하다. 제안된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 2.2kW 유도전동기를 대상으로 직접토크제어 기법을 이용한 속도제어시스템을 설계하였다. 이상허용제어를 위한 시스템의 하드웨어는 고성능 DSP인 TMS320VC33을 이용한 제어보드와 IPM을 이용한 전력회로로 구성된다. 다양한 센서이상에 대한 실험결과, 설계된 시스템의 검출식별 및 이상허용 제어 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

A sensor fault detection and isolation scheme(SFDIS) is adopted to improve the reliability of direct torque controlled induction motor drives and the experimental results are discussed. Major contributions include: experimental analysis of a few important sensor faults, design and implementation of the proposed SFDIS, and the fault tolerant control system(FTCS). Although the adopted SFDIS employs only one observer for residual generation, the system has the function of fault isolation that only multiple observer schemes can have. To verify the performance of the proposed scheme, the speed control system is designed for the 2.2kW direct torque controlled induction motor. Hardware of the control system consists of a control board using TMS320VC33 and a power stack using IPM. Experimental results for various type of sensor faults show the effectiveness of the SFDIS and the FTCS.

Key Words : Fault-tolerant scheme, Direct torque control, Induction motor drives, Observer based fault detection and isolation scheme. Sensor fault.

1. 서 론

*단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수
E-mail : keesang@dku.edu
접수일자 : 2002. 6. 3
1차심사 요청일 : 2002. 6. 5
심사완료일 : 2002. 7. 23

제어기술의 발전으로 각종 자동화 공정에서 교류전동기 구동 서보제어장치의 적용이 급증하고 있다^[1]. 이와 같은 자동화 공정에서 구동 서보장치의 이상은 전체 시스템의 운전성능을 감퇴시켜 제품의 질 저하를

초래하며 신속한 검출, 보상이 이루어지지 않을 경우, 전체 시스템의 긴급정지 및 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 구동 서보장치의 신뢰도 확보를 위한 대책이 강구될 필요가 있으며, 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 가장 효과적인 수단은 실시간 적용이 가능한 이상검출식별 및 이상허용제어 기법의 도입이다^[2].

본 논문에서는 직접토크제어되는 유도전동기 구동장치의 신뢰도 개선을 위하여 제어기에 귀환 정보를 제공하는 엔코더와 전류센서의 이상을 조기에 검출식별하기 위한 이상검출식별 및 보상시스템의 실현 연구 결과를 기술한다. 적용하고자하는 이상검출식별기법은 상태공간개념에 근거한 관측기 기반 기법이며, 이상 식별을 위해 여러개의 관측기를 병렬적으로 구동해야 하는 기존의 다중관측기 기법과 달리 한 개의 관측기만으로 식별정보를 발생하며 계산량의 문제가 없어 실시간 적용이 용이하다^[3]. 성능검증을 위한 제어기 및 이상검출식별시스템은 고성능 DSP인 TMS320VC33을 이용한 제어보드와 IPM을 이용한 전력회로로 구성하였으며 다양한 센서 이상 조건하에서 성능 검토를 수행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 유도전동기 모델 및 직접토크제어기법에 대하여 기술하였으며, 3장에는 센서 이상의 영향을 해석하였다. 4장에서는 관측기 기반 센서 이상허용 제어기법의 설계방법을 제시하고, 5장에서는 구현한 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어 구성을 설명하며, 6장에서는 실험결과를 분석 검토하였다. 마지막으로 7장은 결론이다.

2. 유도전동기 모델 및 DTC의 개념

고정자 기준 정지좌표계에서 유도전동기의 모델은 다음과 같이 표현된다^[1].

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \tag{1}$$

$$\mathbf{v}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\lambda_r}{dt} - j\omega_r \lambda_r \tag{2}$$

$$\lambda_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \tag{3}$$

$$\lambda_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \tag{4}$$

여기서, 첨자 s와 r은 고정자와 회전자를 표시하며, L_s , L_r , L_m 은 각각 권선의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스이다. 또 R_s , R_r 은 권선 저항이며, ω_r 은 회전자의 전기 각속도이다. 이때 유도전동기의 토크는 식 (5)와 같이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{as} i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{as}) \tag{5}$$

여기서, P는 유도전동기의 극수이다.

그림 1에 DTC 시스템의 전체 구성도를 나타내었다. 이 그림으로부터 DTC의 구현을 위해서는 고정자 자속의 추정이 필요하며, 이것은 식 (1)의 변형인

$$\lambda_s = \int (\mathbf{v}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt \tag{6}$$

에 의해 수행한다. 또한 고정자 자속의 크기 및 각 위치는 다음 식들로부터 계산한다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \tag{7}$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{as}} \right) \tag{8}$$

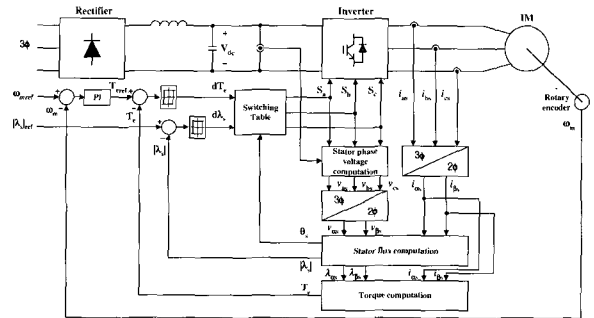


그림 1 유도전동기 직접토크제어 시스템의 구조
Fig. 1 A structure of direct torque controlled induction motor drives

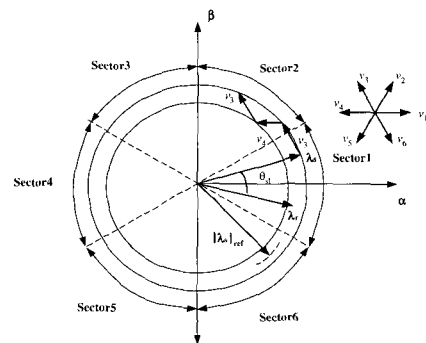


그림 2 인버터의 전압벡터에 의한 고정자 자속과 토크의 제어
Fig. 2 Control of stator flux and torque using inverter voltage switching vector

DTC에서는 토크와 고정자 자속의 추정치를 목표치와 히스테리시스 비교하여 전압벡터를 선택함으로써 토크와 자속을 원하는 방향으로 제어한다. 그림 2는 고정자 자속벡터가 섹터 1에 위치하는 경우로서 자속과 토크제어의 원리를 나타내고 있다^[1,4].

3. 센서이상 모델링 및 효과

DTC 시스템을 실현하기 위해서는 앞장에서 설명한 것과 같이 기본적으로 회전자 속도 정보와 고정자 자속 정보가 필요하다. 일반적으로 속도는 엔코더에 의해 측정하고, 고정자의 자속 정보는 측정된 상전압, 상전류와 전동기의 파라미터를 이용하여 추정한다.

3.1 엔코더 이상의 효과

로터리 엔코더는 회로상의 원인이나 사용환경에 따라 이상이 발생할 수 있다. 엔코더 이상은 식(9)와 같이 이득의 변화로 표현할 수 있다^[2].

$$\omega_m^m = (1 - \gamma) \omega_m \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (9)$$

여기서, ω_m^m 은 회전자 기계적 각속도의 추정치이다. 이후의 전개에서 위 첨자 'm'은 측정치 또는 계산치를 나타낸다. 엔코더 이상은 수광소자가 차단되어 출력 펄스가 발생되지 못하는 경우($\gamma=1$), 원판의 홀 중 일부가 차단되어 출력 펄스가 감소된 경우 ($0 < \gamma < 1$) 및 γ 가 간헐적으로 [0,1] 내의 임의값을 취하는 경우로 분류된다^[2]. 속도제어기는 속도 추정치에 근거하여 동작하며, 측정 속도가 기준 속도에 수렴하도록 작용한다. 따라서 엔코더 이상이 발생한 경우, 전동기의 실제 속도는 이상 양상에 따라 달라진다. 즉, $\gamma=1$ 인 경우에는 제어가 항상 양의 토크를 발생하므로 속도제어루프가 불안정해지는 결과를 초래하며, $0 < \gamma < 1$ 인 경우에는 $(1 + \gamma)\omega_{mref}$ 가 전동기의 최대속도를 초과하지 않을 경우 기준 속도(ω_{mref})보다 증가하여 정상상태 편차를 발생한다. 또한 γ 가 간헐적으로 변화하는 경우에는 속도특성도 간헐적으로 변화하여 제어목적의 달성이 불가능하다.

3.2 전류센서 이상의 효과

전류 측정에는 홀 전류센서가 사용된다. 홀 전류 센서는 변성기와 홀소자 및 연산증폭회로로 구성되며, 이 센서는 외부의 기계적인 원인, 코어의 자기포화현

상 등의 회로적 원인으로 인하여 비정상적인 측정결과를 제공할 수 있다. 발생 가능한 고장의 유형과 대응되는 고장모델을 표 1에 보였다.

표 1 전류센서 이상의 모델

Table 1 Model of current sensor faults

이상의 형태	이상모델	추정오차
이득변화	$(1 - \epsilon)I_a \sin(\omega t)$	$e_g = \epsilon I_a \sin(\omega t)$
오프셋	$I_a \sin(\omega t) + I_{offset}$	$e_o = -I_{offset}$
포화	I_{sat}	$e_s = I_a \sin(\omega t) - I_{sat}$
잡음	$I_a \sin(\omega t) + n(t)$	$e_n = -n(t)$
단선	0	$e_{open} = I_a \sin(\omega t)$
접촉불량	[0, 1]	$e_{intt} = [I_a \sin(\omega t), 0]$

위의 전류센서의 이상유형 중 오프셋과 이득변화가 발생한 경우 DTC 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다.

경우 1 : i_a 센서에 오프셋이 존재하는 경우

이상효과를 분석하기 위하여 표 1의 이상모델을 이용하여 토크리플을 구하면

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_s| (-I_{offset}) \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_s - \alpha) \quad (10)$$

가 된다. 여기서 $\theta_s = \omega t$ 이고 $\alpha = \tan^{-1}\sqrt{3}$ 이다. 식(10)은 전류센서에 오프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크리플이 발생함을 의미한다^[3].

경우 2 : i_a 센서에 이득변화가 발생한 경우

센서 이득변화로 인하여 발생하는 토크리플은

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_s| \epsilon I_a \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sin(2\theta_s + \alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (11)$$

가 된다. 따라서 전류센서의 이득변화가 전원주파수의 2배의 주파수 성분을 가지는 토크리플을 발생함을 알 수 있다^[3].

4. 직접토크제어 유도전동기의 센서 이상허용 제어

유도전동기의 이상검출 기법 연구는 전동기 모델의

비선형성으로 인하여 모델기반 기법보다는 이상 데이터의 주파수분석에 근거한 방법들에 치중되었다^[5,6]. 이 방법의 기본원리는 패턴분류이기 때문에 전동기 자체의 이상진단에는 유용하지만 실시간 구현이 어렵고, 센서이상의 조기 진단이나 센서이상에도 불구하고 보상을 수행함으로써 계속적으로 제어시스템의 성능을 요구하는 수준으로 유지시킬 수 있는 이상허용 제어에의 적용은 곤란하다.

최근, 기존 기법의 가장 큰 문제점인 실시간 구현의 어려움을 해결할 수 있는 관측기 기반 이상진단기법이 제안되었다^[3]. 이 기법은 단일 관측기 및 부수적인 논리에 의해 다중 관측기 기법과 거의 동일한 이상검출 식별 성능을 얻을 수 있으며 센서이상의 조기진단과 이상허용 제어에 효과적으로 도입될 수 있다.

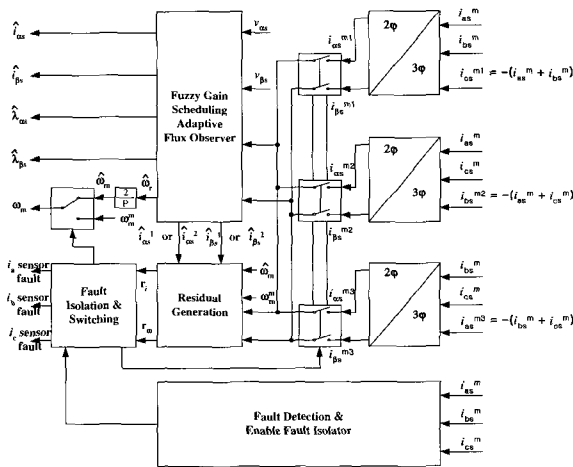


그림 3 제안된 센서이상검출식별 시스템의 구조
Fig. 3 Block diagram of the proposed SFDIS

이 센서이상 진단 시스템의 구조는 그림 3과 같이 잔차발생기, 이상 검출부 및 이상센서의 식별보상부로 구성되며 계층적, 순차적으로 동작한다. 첫 번째 과정인 이상검출은 고정자 전류의 평형성 검사에 의해 수행된다. 이 검사에서 전류센서의 이상이 검출되면 이상센서를 식별하기 위한 이상식별부를 활성화시킨다. 이상식별부는 관측기의 입력들을 미리 선정된 논리에 따라 절환 투입하고, 투입된 입력에 대한 적응관측기의 추정결과를 분석하는 2단계의 식별과정을 포함한다. 마지막으로 발생한 이상의 효과는 식별된 이상센서의 추정치를 관측기 입력에서 제외시킴으로써 보상될 수 있다.

4.1 잔차발생을 위한 적응 자속관측기

제안된 이상진단 알고리즘의 핵심은 잔차발생을 위한 상태관측기이다. 이 상태관측기는 고정자 자속과 고정자 전류의 추정치를 제공하는 전차원 관측기이며, 퍼지 이득조정 알고리즘에 근거한 극점영역 배치기법을 적용한다. 또한 속도 및 고정자 저항 추정을 위한 적응 알고리즘을 포함한다. 먼저 유도전동기는 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다^[3].

$$\begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} \\ \frac{d\lambda_s}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_r} + \frac{1}{\sigma T_s}\right)I + \omega_r J & \frac{1}{\sigma L_s T_r} I - \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} J \\ -R_s I & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \lambda_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} I \\ I \end{bmatrix} \mathbf{v}_s \quad (12)$$

여기서 $T_r = L_r/R_r$, $T_s = L_s/R_s$, $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$, $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $O = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 이다. 식(12)는

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (13)$$

의 형태가 되고, 출력방정식은 고정자 전류를 측정한다면 $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{i}_s$ 가 된다. 유도전동기는 위와 같은 모델을 선택한 경우 가관측하므로 다음과 같은 상태관측기가 존재한다.

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (14)$$

여기서 \mathbf{K} 는 관측기 이득행렬로서 관측기가 안정되도록 적절히 선정한다. 시스템 행렬 \mathbf{A} 는 속도의 함수이므로 \mathbf{K} 또한 속도의 함수가 되어야 한다. \mathbf{K} 를 속도의 함수로 해석적인 방법에 의하여 구하는 것은 대단히 복잡하여 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해서 ω_r 을 조정변수(scheduling variable)로 하여 미리 선정된 동작점에서 관측기가 원하는 고유치를 갖도록 극점배치 방법에 의하여 이득을 구한 후 이외의 영역에서는 다음의 퍼지규칙에 의하여 이득을 조정한다^[3].

$$\text{IF } \omega_r(t) \text{ is } F_k \text{ THEN } K_{ij} \text{ is } L_{ijk} \\ (i=1, \dots, 4, j=1, 2, k=1, \dots, N)$$

여기서, F_k 에 대한 퍼지집합은 모두 이등변 삼각형으로 선정하며, L_{ijk} 는 미리 선정된 속도에서의 관측기 이득이고, K_{ij} 는 추론된 이득이다.

그리고 Lyapunov 안정도 개념에 근거한 속도 및 고정자 저항의 추정을 위한 적응규칙은 다음과 같다^[3].

$$\begin{aligned} \widehat{\omega}_r = & K_{\omega p} [(b \hat{\lambda}_{\beta s} - \hat{i}_{\beta s}) e_{ias} - (b \hat{\lambda}_{\alpha s} - \hat{i}_{\alpha s}) e_{i\beta s}] \\ & + K_{\omega i} \int [(b \hat{\lambda}_{\beta s} - \hat{i}_{\beta s}) e_{ias} - (b \hat{\lambda}_{\alpha s} - \hat{i}_{\alpha s}) e_{i\beta s}] dt \end{aligned} \quad (15)$$

$$\widehat{R}_s = -K_{Ri} \int [\hat{i}_{\alpha s} e_{ias} + \hat{i}_{\beta s} e_{i\beta s}] dt \quad (16)$$

여기서, $b=1/(\sigma L_s)$, $e_{ias} = i_{\alpha s} - \hat{i}_{\alpha s}$, $e_{i\beta s} = i_{\beta s} - \hat{i}_{\beta s}$ 이고 $K_{\omega i}$, $K_{\omega p}$ 는 속도추정을 위한 PI 이득이며, K_{Ri} 는 저항추정을 위한 적분이득이다.

4.2 이상 검출 및 식별

이상진단을 위해서는 정보의 다중화가 필요하며, 이러한 다중성(redundancy)은 여러개의 관측기를 병렬적으로 구동함으로써 확보될 수 있다. 그러나 여러개의 관측기를 병렬적으로 구동하는 것은 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 실시간 적용이 어렵다. 따라서 한 개의 관측기만을 사용하면서 관측기 입력을 논리적으로 변경하여 투입하는 방법으로 다중관측기와 같은 다중성을 확보할 수 있는 방법이 제안되었다^[3].

먼저 엔코더 이상검출을 위한 잔차는 관측기로부터 제공되는 추정치와 엔코더에 의한 측정치의 차로 정의한다.

$$r_\omega = |\omega_m^m - \widehat{\omega}_m| \quad (17)$$

유도전동기 구동장치를 위한 이상검출식별 시스템이 기본적으로 검사하는 잔차는 식 (17)의 r_ω 와 식 (18)에 주어진 고정자 전류의 평형방정식이다.

$$i_{sum} = i_{\alpha s}^m + i_{\beta s}^m + i_{cs}^m \quad (18)$$

이상의 검출은 식 (17)과 식 (18)에 대한 임계치 검사에 의해 전류센서 이상과 엔코더 이상을 식별하는 것으로부터 시작된다.

IF ($i_{sum} > th_1$) THEN current sensor fault

ELSE IF ($r_\omega > th_\omega$) THEN encoder fault

ELSE normal

전류센서 이상의 경우에는 이상센서를 식별하기 위한 추가정보 및 논리가 필요하며 이를 위해 고정자 전류의 평형식으로부터 도출된 다음의 테스트입력(TIS)들을 순차적으로 관측기에 투입한다.

$$TIS(1) = \{ i_{\alpha s}^m, i_{\beta s}^m, i_{cs}^m \} \text{ where } i_{cs}^m = -(i_{\alpha s}^m + i_{\beta s}^m)$$

$$TIS(2) = \{ i_{\alpha s}^m, i_{cs}^m, i_{\beta s}^m \} \text{ where } i_{\beta s}^m = -(i_{\alpha s}^m + i_{cs}^m)$$

TIS(1)은 a상 및 b상 전류센서의 이상과 c상 전류센서 이상을 식별하기 위한 관측기 입력이며, 잔차와 식별 논리는 다음과 같다.

잔 차 :

$$r_1 = |i_{\alpha s}^{m1} - \widehat{i}_{\alpha s}^{m1}| + |i_{\beta s}^{m1} - \widehat{i}_{\beta s}^{m1}|$$

식별논리 :

IF ($r_1 > th_1$) THEN i_a sensor or i_b sensor fault

ELSE i_c sensor fault

여기서, i_{xs}^{m1} 은 TIS(1)의 2상 정지좌표계 표현이며 \widehat{i}_{xs}^{m1} 은 TIS(1)이 투입될 때 관측기에 의해서 추정된 고정자 전류의 2상 정지좌표계 표현이다. 이 잔차가 선정된 임계치보다 크면 a상 또는 b상 전류센서의 이상이 선언되며, 임계치보다 작다면 c상 전류센서의 이상이 선언된다. 다음으로 a상 또는 b상 전류센서의 이상이 선언된 경우에는 이상센서의 식별을 위해 c상 전류의 측정치를 포함한 TIS(2)를 투입한다. 이때 잔차와 식별논리는 다음과 같다.

잔 차 :

$$r_2 = |i_{\alpha s}^{m2} - \widehat{i}_{\alpha s}^{m2}| + |i_{\beta s}^{m2} - \widehat{i}_{\beta s}^{m2}|$$

식별논리 :

IF ($r_2 > th_2$) THEN i_a sensor fault

ELSE i_b sensor fault

여기서, i_{xs}^{m2} 은 TIS(2)의 2상 정지좌표계 표현이며 \widehat{i}_{xs}^{m2} 은 TIS(2)가 투입될 때 관측기에 의해서 추정된 고정자 전류의 2상 정지좌표계 표현이다. 이 잔차는 a, c상 전류

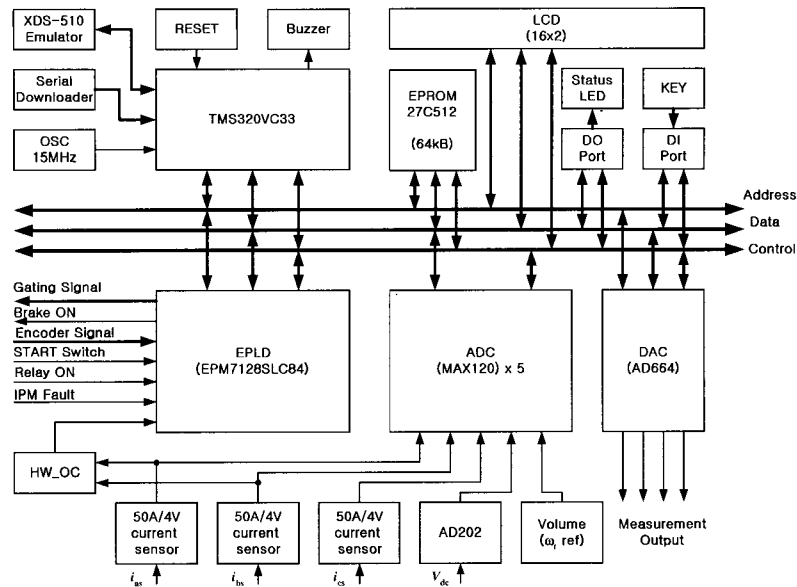


그림 4 제어보드의 구성 블록도
Fig. 4 Block diagram of control board

센서에 의해 발생된 것이므로 잔차가 임계치보다 크면 a상 이상이 선언되고 그렇지 않은 경우에는 b상 이상이 선언된다. 전류센서 이상은 정상인 두상 센서의 측정치에 의해 i_{as} , i_{bs} 를 산출하여 투입함으로써 보상된다.

5. 센서 이상허용 제어시스템의 구현

본 장에서는 직접토크제어 유도전동기를 위한 센서 이상허용 제어시스템의 하드웨어 및 소프트웨어의 구성에 대하여 기술한다.

5.1 하드웨어

시스템의 제어보드는 주 프로세서로서 고성능 DSP인 TMS320VC33을 사용하였으며, 이 DSP는 75 MIPS(Million Instructions Per Second), 150 MFLOPS (Million Floating-Point Operations Per Second)의 연산능력을 가진다. 또한 34 k 워드의 내부 dual-access SRAM를 가지고 있으므로 외부 RAM를 추가할 필요가 없어서 전체 보드의 크기를 축소할 수 있다. 제어보드의 전체 구성도는 그림 4와 같다.

CPU 주변에는 클럭 발생회로, 리셋회로, 메모리 등으로 구성되는 CPU 관련 기본회로들과 EPLD가 설치되어 있다. 대부분의 디지털 논리회로는 EPLD (EPM7128SLC84)에 집적하였다. 구성도에는 생략했지만, 이 EPLD는 JTAG 포트를 통한 ISP(In-Circuit

System Programming) 기능을 가지기 때문에 PCB에 장착된 상태에서 프로그램이 가능하다. EPLD에 내장된 회로는 어드레스 디코딩 회로, 인터럽트 제어 회로, 상태 레지스터, 주변소자들을 위한 클럭 분주 회로, IPM을 위한 게이팅 회로 및 데드타임 발생 회로, 그리고 엔코더 신호 처리를 위한 M/T 방식 관련회로가 있다.

제어보드에서 센서로부터 측정된 값들을 입력받기 위한 A/D 컨버터로는 MAX-120(conversion time 1.6 [μsec]) 5개를 사용하였고, 제어변수들의 실시간 관측을 위한 D/A 컨버터로는 AD644를 사용하였다.

직접토크제어의 구현시 3장에서 언급한바와 같이 고정자 전류와 상전압에 대한 정보는 필수적이며 속도제어를 위해서는 속도 정보도 필요로 한다. 전류의 측정을 위해서는 비접촉식 홀센서를 사용하여 A/D 컨버터로 입력받았다. 상전압을 직접적으로 측정하는 것은 어렵기 때문에 직류링크전압을 AD202 Isolation Amplifier를 통하여 A/D 컨버터로 입력된 측정결과와 인버터의 게이팅 신호를 이용하여 다음과 같이 간접적으로 계산하였다.

$$v_{as} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \tag{19}$$

$$v_{bs} = \frac{-S_a + 2S_b - S_c}{3} V_{dc} \tag{20}$$

$$v_{cs} = \frac{-S_a - S_b + 2S_c}{3} V_{dc} \quad (21)$$

여기서, V_{dc} 는 직류링크전압이고, S_a, S_b, S_c 는 인버터의 게이팅 신호이다. 전동기의 속도는 증분형 광학 엔코더를 사용하여 M/T 방식으로 측정하였다.

외부에 시스템의 동작상태를 표시하기 위해 8개의 LED와 16자 2행의 LCD 모듈, 그리고 부저를 설치하였다. LED는 인버터의 동작상태를 나타내는데 사용되며, LCD 모듈은 각종 제어변수를 실시간 모니터링하는 용도로 사용한다.

전력변환부는 IPM(PM75RSD060)을 이용하여 구성하였으며, 전력변환부와 제어보드 사이의 인터페이스 신호들(게이팅 신호, 브레이크 구동신호, IPM fault 신호)과 엔코더 신호들은 전부 포토커플러(photo-coupler)를 이용하여 전기적으로 절연하였다.

시스템의 보호기능은 하드웨어적인 보호기능과 소프트웨어적인 보호기능을 중첩하여 사용하였으며, 하드웨어적으로 IPM fault, 과전류에 대하여 처리하며, 소프트웨어적으로 IPM fault, 과전류, 과전압, 저전압, 과속도를 처리한다.

5.2 소프트웨어

프로그램은 C 언어와 어셈블리 언어를 혼용하여 작성하였으며, 알고리즘 부분은 주로 C 언어를 사용하고 하드웨어 입출력과 관계된 부분은 어셈블리 언어를 사용하였다.

프로그램은 주 프로그램과 인터럽트 서비스 루틴으로 구성된다. 주 프로그램에서는 각종 상수, 변수와 CPU의 여러 내부 인터럽트 벡터를 초기화하며, A/D 컨버터의 초기 오프셋 값을 계산한다. 이와 같은 초기화 과정이 끝나면 무한히 반복되는 메인 루프(main loop)로 들어간다.

메인 루프에서는 START 스위치를 검사해서 전동기를 기동하며, 직류링크전압의 과전압(over voltage)과 저전압(under voltage)상태를 검사해서 브레이크의 가동 여부를 결정하고, 100[msec] 주기로 각종 변수를 LCD에 표시한다.

제어 및 이상진단 알고리즘은 인터럽트 서비스 루틴으로 구성되어 있다. 메인 루프가 무한 루프에 있는 동안 자속 및 토크 제어루프는 Timer 0 인터럽트에 의하여 50[μsec]의 주기로 수행되고 약 2[msec]의 주기로 속도 제어루프가 수행된다.

그림 5는 자속 및 토크 제어루틴의 순서도이다. 이 루틴은 A/D 컨버터로부터 상전류 i_{as}, i_{bs} 와 i_{cs} 그리고 V_{dc} 를 읽어서 제어 및 이상진단 알고리즘을 수행하고 히스테리시스 방식의 비교에 의해 출력전압 선정표를 참조하여 IPM를 구동하기 위한 게이팅 신호를 EPLD로 보내는 역할을 수행한다.

그림 5와 6에서 Fault_flag는 전류센서 이상의 발생, Fab_flag는 a상 혹은 b상 전류센서의 이상을 표시한다. 그리고 Fa_flag는 a상, Fb_flag는 b상, Fc_flag는 c상 전류센서의 이상을 표시한다.

또한 Fen_flag는 엔코더 이상을 표시한다. Com_mode는 현재 상태가 전류센서 이상에 대하여 보상과정 중임을 나타내는 플래그로서, 첫 번째 용도는 보상과정 중일 때 또 하나의 전류센서에 이상이 발생하면 계속적인 제어가 불가능하므로 이상 센서가 교체되어야함을 지시하고, 두 번째 용도는 4장의 규칙을 다음과 같이 변경함으로써 전류센서와 엔코더의 동시 이상이 발생하였을 때 대처하기 위한 것이다.

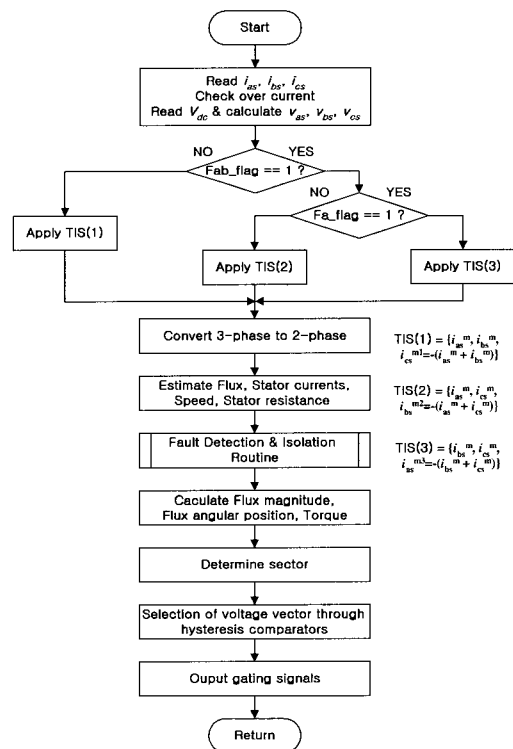


그림 5 자속 및 토크제어 인터럽트 서비스 루틴의 순서도
Fig. 5 Flowchart of flux and torque control interrupt service routine

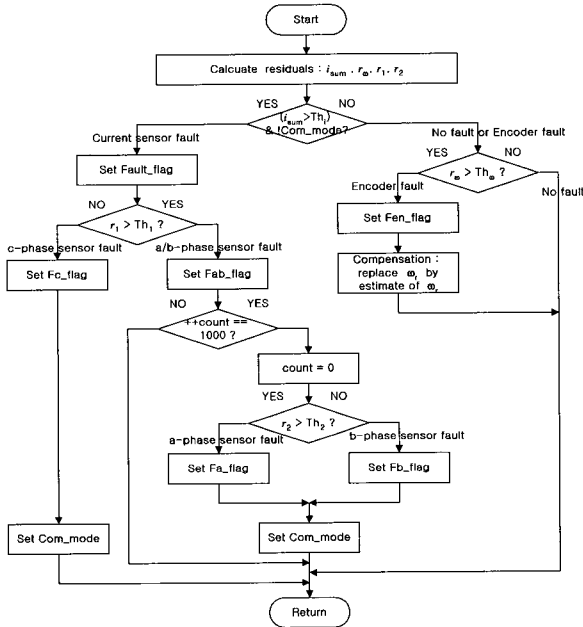


그림 6 이상 검출 및 식별 루틴의 순서도
Fig. 6 Flowchart of fault detection and Isolation routine

```

IF (( isum > th1) & (!Com_mode)) THEN
    current sensor fault
ELSE IF (rw > thw) THEN
    encoder fault
ELSE
    normal
    
```

즉, 제안한 알고리즘은 전류센서이상을 우선 식별 대상으로 하고 있다. 전류센서이상이 발생한다면 상태관측기로부터 얻어지는 속도추정 정보는 신뢰할 수 없기 때문이다. 엔코더와 전류센서가 동시에 이상이 발생하면 먼저 전류센서 이상식별 및 보상이 수행되며, 다음으로 전류센서의 이상식별보상이 완료된 이후에 엔코더 이상 검출 및 보상이 수행된다.

실제 실현시 주의해야만 하는 다른 한가지 사항은 a상 혹은 b상 전류센서의 이상으로 판명되어서 Fab_flag가 설정된 후 곧바로 a상 이상인지 b상 이상인지를 평가할 수 없다는 것이다. 관측기 입력이 갑자기 변경된 후 관측기는 일정 시간이 경과해야 정확한 값을 추정할 수 있기 때문이다. 따라서 관측기의 추정치가 실제값으로 수렴하기까지는 이상식별을 수행하지 않는다. 수렴시간의 선정은 이 이상검출진단시스템 설

계시 매우 중요한 설계인자로서 대상계통의 응답속도, 할당된 관측기의 극점 위치, 요구되는 이상검출식별시스템의 응답시간 등을 종합적으로 고려하여 선정해야 한다. 본 시스템에서는 평가지연시간을 1000 샘플타임(50[msec])으로 설정하였다.

6. 실험 결과 및 검토

이상 해석 결과의 타당성과 제안된 이상검출식별법의 유용성을 검증하기 위하여 2.2[kW]의 유도전동기를 대상으로 직접토크제어 기법을 이용한 속도제어시스템을 구현하고, 여기에 제안된 센서이상 검출식별 및 보상 알고리즘을 탑재한 후 적용 실험과 성능 검토를 수행하였다. 전체적인 시스템 설계시 사용된 전동기 정격과 파라미터, 제어기 파라미터 및 이상검출식별시스템의 제반 파라미터 등은 '참고문헌 3'과 동일한 값을 사용하였다.

실험시 각종 제어변수는 DSP의 RAM에 저장했다가 에뮬레이터와 Code Composer를 이용하여 PC로 전송한 다음 MATLAB을 이용하여 그림으로 만들었다.

6.1 고장 영향의 분석

일정 기준 자속 및 속도 제어시 엔코더 이상의 영향을 분석하였다. 실험조건은 기준속도 300[rpm]으로 운전시 1[sec]에서 엔코더 이득이 10% 감소한 경우이며, 그림 7에 의하면 엔코더 이득의 감소로 인하여 실제 전동기 속도가 상승함을 보여준다. 그리고 잔차가 증가하여 이상검출이 가능함을 알 수 있다. 그림 8은 a상 전류센서에 약 1[A]의 오프셋이 발생한 경우로서

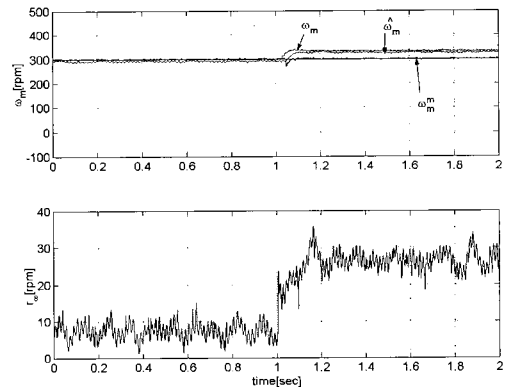


그림 7 엔코더 이상시 응답
Fig. 7 Responses for an encoder fault

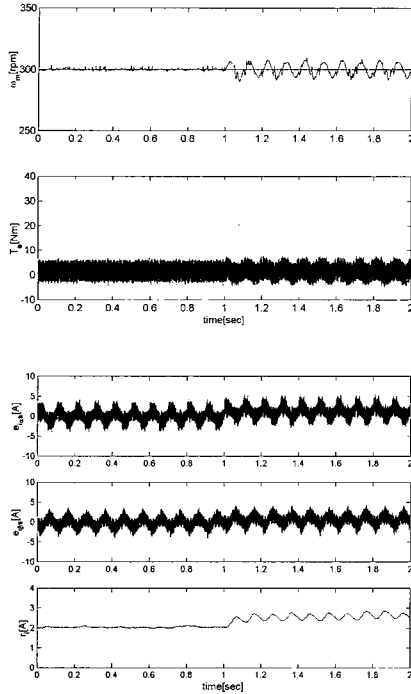


그림 8 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우의 고장 효과
Fig. 8 Effect of a current sensor fault(offset)

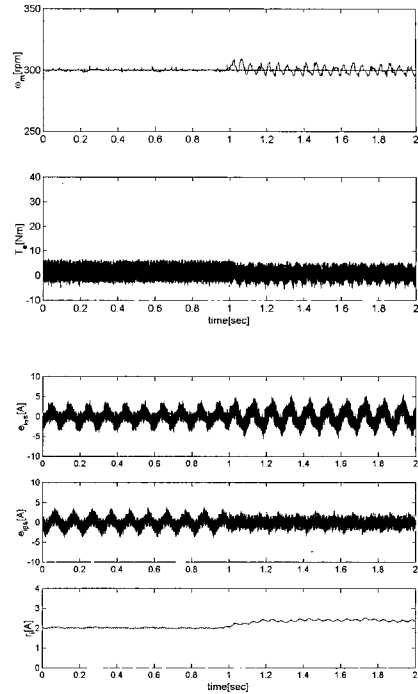


그림 9 전류센서에 이득변화가 발생한 경우의 고장효과
Fig. 9 Effect of a current sensor fault(gain change)

3장에서 해석한 결과와 같이 전원주파수와 동일한 주파수의 속도리플 및 토크리플이 발생함을 보여준다. 그림 9는 a상 전류센서에 측정치의 10%에 해당하는 이득변화가 발생한 경우로서 역시 해석한 결과와 같이 전원주파수의 2배 주파수의 속도리플 및 토크리플이 발생함을 나타낸다.

6.2 센서 이상허용 제어 성능 검토

이상허용 제어 성능을 검토하기 위하여 엔코더 신호선의 단선과 a상과 c상 전류센서에 1[A] 크기의 오프셋이 발생한 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

그림 10은 엔코더 신호선이 단선되어 속도의 측정치가 영이 되었음에도 불구하고, 속도의 추정치를 이용하여 계속적인 운전이 가능함을 보여준다. 따라서 제안한 기법을 도입한 제어시스템은 최악의 상황인 엔코더 신호선의 갑작스런 단선에도 원하는 속도제어 성능을 유지할 수 있다.

그림 11은 a상 전류센서에 이상이 발생한 경우이며 전류센서의 이상 발생 직후 전동기의 속도가 기준치로부터 이탈하여 잠시동안 리플이 발생하였다가 이상검출 및 이상센서의 식별, 보상으로 원래의 기준속도로 회복됨을 보여준다.

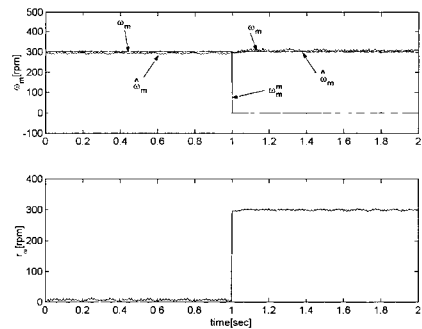


그림 10 엔코더 이상시 보상 결과
Fig. 10 Compensated responses for an encoder fault

4장에서 기술한바와 같이 이상센서의 식별은 계층적, 순차적으로 진행된다. 1단계에서 전류센서와 엔코더 중에서 전류센서에 이상이 발생하였음을 Fault_flag에 의하여 선언되고 이상식별부가 활성화된다. 다음 단계는 어느 전류센서에 이상이 발생했는지 식별해내는 단계로서 2단계에서는 (a, b)상과 c상 중 어느 쪽에 이상이 발생했는지 식별이 이루어지며 Fab_flag에 의하여 (a, b)상에 이상이 발생했음을 지시하고 있고, 3단계에서는 최종적으로 a상 센서에 이상이 발생했음이

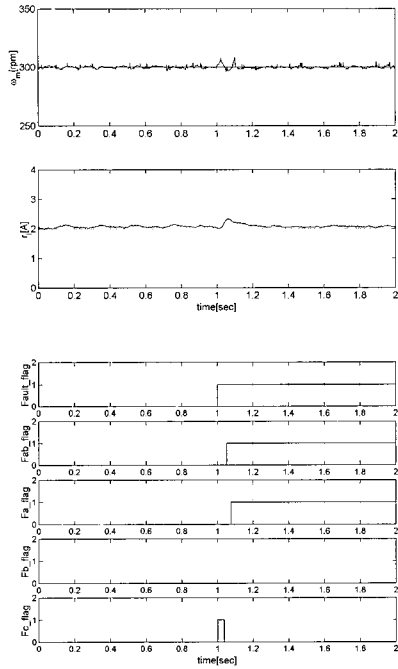


그림 11 a상 전류센서 이상시 제안한 SFDIS의 응답 특성
 Fig. 11 Responses of the proposed SFDIS for a current sensor fault(a-phase)

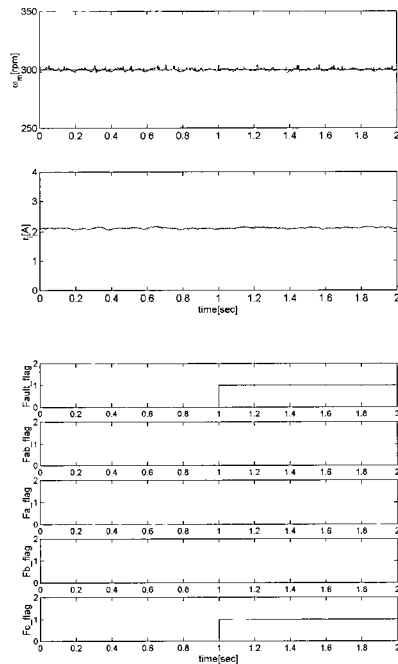


그림 12 c상 전류센서 이상시 제안한 SFDIS의 응답 특성
 Fig. 12 Responses of the proposed SFDIS for a current sensor fault(c-phase)

식별되어 Fa_flag가 설정된다. b상에 대하여는 a상과 유사하므로 생략한다.

그림 12는 c상 전류센서에 이상이 발생한 경우에 대한 실험결과이며 이상발생 즉시 이상의 검출 및 식별이 이루어지고 있다. 정상시의 제어입력 구성에는 c상 전류의 측정치를 사용하지 않아서 c상 전류센서 이상시에는 제어입력을 재구성할 필요가 없으므로 제어성능에 영향이 없음을 알 수 있다.

위의 실험결과들에 의하면 제안된 센서 이상허용 제어기법은 각 센서 이상을 정확하게 검출식별하고 보상하는 기능을 가짐으로서 전체 제어시스템의 신뢰성을 향상에 기여할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 직접토크제어 유도전동기 속도제어시스템의 신뢰성 개선을 위하여 최근에 제안된 관측기 기반 센서 이상검출식별 기법 및 이상허용 제어기법의 설계방법을 기술하고 적용 성능을 실험적으로 검토하였다. 실현된 시스템은 고성능 DSP인 TMS320VC33을 이용한 제어보드와 IPM을 이용한 전력회로로 구성되었다. 실험에 의한 성능 검토 결과에 의하면 제안된 센서 이상검출식별 기법은 엔코더와 전류센서 이상을 조기에 검출식별 할 수 있으며, 그 성능이 매우 우수하다. 또한 기존의 다중 관측기 기법과 달리 한 개의 관측기만을 사용하기 때문에 실시간 적용이 용이하여 이상허용제어계의 구성에 적합하다. 제안된 센서고장 검출식별기법 및 이상허용 제어기법은 직접토크제어되는 유도전동기 구동시스템의 신뢰성 및 성능향상에 기여함은 물론 다른 제어방식으로 구동되는 유도전동기와 동기전동기를 포함한 다른 전동기 구동시스템에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Science Publications, 1998.
- [2] C. Thybo, "Fault-tolerant control of inverter fed induction motor drives", Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, 2000.
- [3] 이기상, 류지수, "직접토크제어 유도전동기 구동 서보 시스템을 위한 장치고장 진단 기법", 전기학회논문지, Vol. 51D, No. 6, 2002.
- [4] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response

and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 22, No. 5, pp. 820~827, 1986.

- [5] M.Y. Chow et. al., "A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 6, pp. 446~453, 1991.
- [6] R.R. Schon and T.G. Habetler, "A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions", Electric machines and power systems, Vol. 26, pp. 141~152, 1995.

저 자 소 개



류지수(柳志帥)

1968년 7월 28일생. 1990년 단국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 단국대 전기전자컴퓨터공학부 강사.



이기상(李起常)

1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 University of Washington 방문교수. 1983년~현재 단국대 전기전자컴퓨터공학부 교수.