

## 직접토크제어 유도전동기의 센서 이상허용 제어

류지수, 이기상

단국대학교 전기전자컴퓨터공학부

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

Ji-Su Ryu and Kee-Sang Lee

School of Electrical, Electronics, and Computer Engineering, Dankook University

#### ABSTRACT

In this paper, the effects of encoder fault and current sensor fault in direct torque controlled induction motor drives are analyzed. On the basis of the analyzed results, a observer based fault detection and isolation scheme is presented. To verify the performance of proposed algorithms, the speed control system is designed for induction motor and evaluated by experimental study. Experimental results various type of sensor faults show the detection and isolation performance of the SFDIS and the applicability of this scheme to fault tolerant control system design.

#### 1. 서 론

제어기술의 발전으로 각종 자동화 공정에서 교류 전동기 구동 서보제어장치의 적용이 급증하고 있다<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 직접토크제어되는 유도전동기 구동장치의 신뢰도 향상을 목적으로 속도추정을 위한 엔코더와 전류센서의 고장이 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 해석하며, 이들 센서고장을 검출하기 위하여 새로운 관측기 기반 센서이상검출기법을 제안한다. 제안하는 이상검출기법은 한개의 관측기에 의해 이상식별이 가능하도록 논리적으로 스케줄

링된 관측기입력을 투입하고 그 잔차를 분석하는 방법이다. 이 기법의 실시간 적용 가능성과 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수행한다.

#### 2. 유도전동기 모델 및 DTC의 개념

고정자 기준 정좌표계에서 유도전동기의 모델은 다음과 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$v_s = R_s i_s + \frac{d \lambda_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r i_r + \frac{d \lambda_r}{dt} - j\omega_r \lambda_r \quad (2)$$

$$\lambda_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\lambda_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (4)$$

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,  $\omega_r$ 은 회전자의 전기 각속도이다. 이때 유도전동기의 토크는 식 (5)와 같이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_s \times i_s) \quad (5)$$

여기서  $P$ 는 극수이다.

DTC는 좌표변환과정과 전류제어루프가 불필요하며, 토크응답이 빠르고 비교적 낮은 인버터 스위칭주파수를 나타내는 특성으로 인하여 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이 기법은 토크와 고정자 자속의 목표치와 추정치의 차를 수단으로 인버터의 전압벡터를 적절히 선택함으로써 토크와 자속의 크기를 원하는 방향으로 직접 제어한다. 이 기본원리를 그림 1에 나타내었다<sup>[1,3]</sup>.

DTC의 구현을 위해서는 고정자 자속의 추정이 필요하며, 이것은 식 (1)의 변형인

$$\lambda_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (6)$$

에 의해 수행된다.

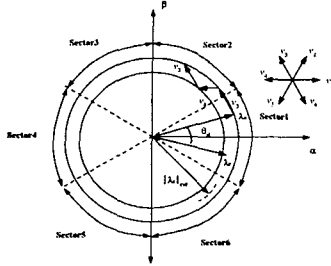


그림 1 인버터의 전압벡터에 의한 고정자 자속과 토크의 제어

Fig. 1 Control of stator flux and torque using inverter voltage vectors

식 (6)의 고정자 자속을  $\alpha, \beta$  축 성분 분해하고, 다음 식들로부터 고정자 자속의 크기 및 각위치를 계산할 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (7)$$

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

### 3. 센서고장 모델링 및 효과

DTC시스템을 실현하기 위해서는 기본적으로 회전자 속도 정보과 고정자 자속 정보가 필요하다. 일반적으로 속도는 엔코더에 의해 측정되고, 고정자의 자속 정보는 측정된 상전압, 상전류와 전동기의 파라미터를 이용하여 추정된다.

#### 3.1 엔코더 고장의 효과

로터리 엔코더는 회로상의 원인이나 사용환경에 따라 이상이 발생할 수 있다. 엔코더 고장은 식(9)와 같이 이득의 변화로 표현할 수 있다<sup>[2]</sup>.

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

여기서  $\omega_m^m$ 은 회전자 기계적 각속도의 측정치이다. 이후의 전개에서 위 첨자 'm'는 측정치 또는 계산치를 나타낸다. 엔코더 고장은 수광소자가 차단되어 출력 펄스가 발생되지 못하는 경우( $\gamma=1$ ), 원판의 홀 중 일부가 차단되어 출력 펄스가 감소된 경우 ( $0 < \gamma < 1$ ) 및  $\gamma$ 가 간헐적으로 [0,1] 내의 임의 값을 취하는 경우로 분류된다<sup>[2]</sup>. 속도제어기는 속도 측정치에 근거하여 동작하며, 측정 속도가 기준 속도에 수렴하도록 작용한다. 따라서 엔코더 고장이

발생한 경우, 전동기의 실제 속도는 고장양상에 따라 달라진다. 즉,  $\gamma=1$ 인 경우에는 제어기가 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( $\omega_{mref}$ )보다 증가하여 정상상태 편차를 발생한다. 또한  $\gamma$ 가 간헐적으로 변화하는 경우에는 속도특성도 간헐적으로 변화하여 제어목적의 달성이 불가능하다.

#### 3.2 전류센서 고장의 효과

전류 측정에는 홀 전류센서가 사용된다. 홀 전류센서는 변성기와 홀소자 및 연산증폭회로로 구성되며, 이 센서는 외부의 기계적인 원인, 자기포화현상 등의 회로적 원인으로 인하여 비정상적이 측정결과를 제공할 수 있다. 발생 가능한 고장의 유형과 대응되는 고장모델을 표 3에 보였다<sup>[4]</sup>.

표 1 전류센서 고장의 모델

Table 1 Model of current sensor faults

고장의 형태	고장모델	측정오차
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]	$e_{intt} = [I_a \sin(\omega t), 0]$

이와 같은 전류센서의 고장유형 중 오프셋과 이득변화가 발생한 경우에 DTC시스템에 미치는 영향은 다음과 같이 된다.

#### 경우 1 : $i_a$ 센서에 오프셋이 존재하는 경우

고장효과를 분석하기 위하여 표 1의 고장모델을 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  $\alpha = \tan^{-1} \sqrt{3}$  이다. 식 (10)은 전류센서에 오프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크리플이 발생함을 의미한다<sup>[4]</sup>.

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<sup>[4]</sup>.

#### 4. 직접토크제어 유도전동기의 센서 이상허용 제어

유도전동기의 고장검출 기법 연구는 전동기 모델의 비선형성으로 인하여 모델기반 기법보다는 고장 데이터의 주파수분석에 근거한 방법<sup>[5,6]</sup>들에 치중되었다. 이 방법의 기본원리는 패턴분류이기 때문에 전동기 자체의 고장진단에는 유용하지만 실시간 구현이 어렵고, 센서이상의 조기 진단이나 센서이상시에도 불구하고 보상을 수행함으로써 계속적으로 제어시스템의 성능을 요구하는 수준으로 유지시킬 수 있는 이상허용 제어계에의 적용은 곤란하다.

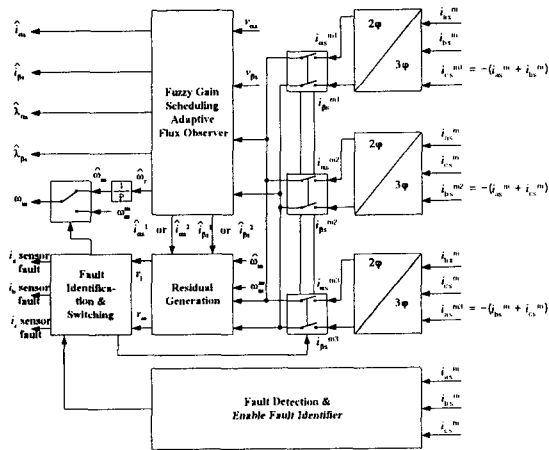


그림 2 제안한 센서고장검출식별 시스템의 구조  
Fig. 2 Block diagram of the proposed SFDIS

본 논문에서는 센서이상의 조기진단과 이상허용 제어계를 구성할 수 있으며 실시간 구현이 용이한 관측기 기반 고장진단기법을 제안한다. 제안하는 센서고장진단 시스템의 구조는 그림 2와 같이 잔차발생기, 고장 검출식별논리 및 고장보상 알고리즘으로 구성된다.

##### 4.1 잔차발생을 위한 적응 자속관측기

제안하는 고장진단 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<sup>[4]</sup>.

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_s}{dt} \\ \frac{d \lambda_s}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_r} + \frac{1}{\sigma T_s}\right) I + \omega_r J & \frac{1}{\sigma L_s T_r} I - \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} J \\ -R_s I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} I \\ I \end{bmatrix} v_s \quad (12)$$

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

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (13)$$

의 형태가 되고, 출력방정식은 고정자 전류를 측정한다면  $y = Cx = i_s$ 가 된다. 유도전동기는 이상과 같은 모델을 선택한 경우 가관측이므로 다음과 같은 상태관측기가 존재한다.

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

여기서  $K$ 는 관측기 이득행렬로서 관측기가 안정되도록 적절히 선정한다. 시스템 행렬  $A$ 는 속도의 함수이므로  $K$  또한 속도의 함수가 되어야 한다.  $K$ 를 속도의 함수로 해석적인 방법에 의하여 구하는 것은 대단히 복잡하여 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해서  $\omega_r$ 를 조정변수(scheduling variable)로 하여 미리 선정된 동작점에서 관측기가 원하는 고유치를 갖도록 극점 배치 방법에 의하여 이득을 구한 후 이외의 영역에서는 다음의 퍼지규칙에 의하여 이득을 조정한다<sup>[4]</sup>.

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

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

그리고 이 관측기는 속도 및 고정자 저항의 추정을 위한 적응규칙을 포함하고 있으며 그 추정식은 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

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

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

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

#### 4.2 고장 검출 및 식별

고장진단을 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 실현이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 한 개의 관측기만을 사용하면서 관측기 입력을 논리적으로 변경하여 투입하는 방법으로 다중관측기와 같은 다중성을 확보할 수 있는 새로운 방법을 제안한다.

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

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

유도전동기 구동장치를 위한 고장검출식별 시스템이 기본적으로 검사하는 잔차는 식(17)의  $r_{\omega}$ 와 식(18)에 주어진 고정자 전류의 평형방정식이다.

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

고장의 검출은 식(17)과 식(18)에 대한 임계치 검사에 의해 전류센서 고장과 엔코더 고장을 식별하는 것으로부터 시작된다.

**IF (  $i_{sum} > th_i$  ) THEN current sensor fault**  
**ELSE IF (  $r_{\omega} > th_{\omega}$  ) THEN encoder fault**  
**ELSE normal**

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

$$TIS(1) = \{ i_{as}^m, i_{\beta s}^m, i_{cs}^{m1} \} \text{ where } i_{cs}^{m1} = -(i_{as}^m + i_{\beta s}^m)$$

$$TIS(2) = \{ i_{as}^m, i_{cs}^m, i_{\beta s}^{m2} \} \text{ where } i_{\beta s}^{m2} = -(i_{as}^m + i_{cs}^m)$$

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

잔 차 :

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

식별논리 :

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

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

잔 차 :

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

식별논리 :

**IF (  $r_2 > th_2$  ) THEN  $i_a$  sensor fault**  
**ELSE  $i_b$  sensor fault**

여기서  $i_{cs}^{m2}$ 은 TIS(2)의 2상 정지좌표계 표현이며  $\hat{i}_{cs}^{m2}$ 은 TIS(2)가 투입될 때 관측기에 의해서 추정된 고정자 전류의 2상 정지좌표계 표현이다. 이 잔차는 a, c상 전류센서에 의해 발생된 것이므로 잔차가 임계치보다 크면 a상 고장이 선언되고 그렇지 않은 경우에는 b상 고장이 선언된다. 전류센서 고장은 정상인 두상센서의 측정치에 의해  $i_{as}$ ,  $i_{\beta s}$ 를 산출하여 투입함으로써 보상된다.

## 5. 실험 결과 및 검토

제안한 이상허용 제어 기법의 유용성을 검증하기 위하여 2.2[kW]의 직접토크제어 유도전동기<sup>[4]</sup>에 적용 실험을 수행하였다.

실험용 제어보드는 TI사의 TMS320VC33이 주프로세서이며, 실험시 각종 제어변수는 DSP의 SRAM에 저장했다가 Code Composer를 통하여 PC로 전송한 다음 MATLAB를 이용하여 그림으로 만들었다.

### 5.1 고장 영향의 분석을 위한 실험 결과

일정 기준 자속 및 속도 제어시 엔코더 고장의 영향을 분석하였다. 실험조건은 기준속도 300[rpm]으로 운전시 1[sec]에서 엔코더 이득이 10% 감소한 경우이며, 그림 3에 의하면 엔코더 이득의 감소로 인하여 실제 전동기 속도가 상승함을 보여준다. 그리고 잔차가 증가하여 고장검출이 가능함을 알 수 있다.

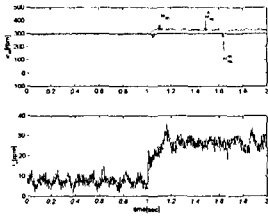


그림 3 엔코더 고장시 속도 및 잔차  
Fig. 3 Speed and residual for an encoder fault

그림 4는 a상 전류센서에 약 1[A]의 오프셋이 발생한 경우로서 3장에서 해석한 결과와 같이 전원주파수와 동일한 주파수의 속도리플 및 토크리플이 발생함을 보여준다.

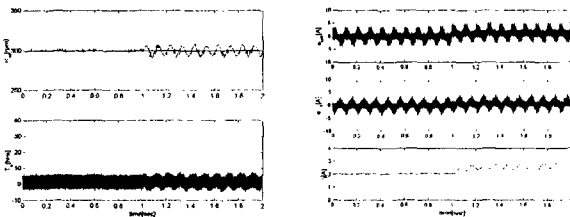


그림 4 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우의 고장 효과  
Fig. 4 Effect of a current sensor fault(offset)

### 5.2 센서 이상허용 제어 성능 검토

이상허용 제어 성능을 검토하기 위하여 a상 전류센서에 1[A] 크기의 오프셋이 발생한 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 5에서 왼쪽 그림은 전동기 속도와 잔차의 시간궤적을 나타낸다. 오른쪽 그림에는 고장 검출 및 식별결과를 도시하였다. 여기서 Fault\_flag는 전류센서 고장의 발생, Fab\_flag는 a상 혹은 b상 전류센서의 고장이 발생함을 표시한다. 또한 Fa\_flag는 a상, Fb\_flag는 b상, 그리고 Fc\_flag는 c상 전류센서의 고장을 표시한다. 그림으로부터 전류센서의 고장 직후 전동기의 속도가 기준치로부터 이탈하여 잠시동안 리플이 발생하였다가 고장검출 및 고장센서의 식별, 보상으로 원래의 기준속도로 회복됨을 보여준다.

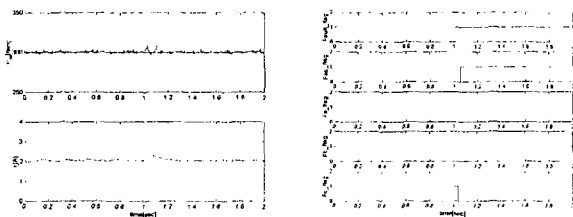


그림 5 a상 전류센서 고장시 제안한 SFDIS의 응답 특성

Fig. 5 Responses of the proposed SFDIS for a current sensor fault(a-phase)

b상 및 c상 전류센서에 대한 실험결과는 생략하지만 이들 고장들 또한 정확하게 검출식별하고 보상 가능하다. 그리고 부하변동 등의 외란이 존재하더라도 우수한 진단성능을 나타냄을 확인하였다.

## 6. 결론

본 논문에서는 직접토크제어되는 고성능 유도전동기 속도제어시스템에서 센서고장이 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하고 센서고장의 검출식별 기법을 제안하였다. 제안한 고장검출 기법은 엔코더와 전류센서 고장을 조기에 검출식별 할 수 있으며, 한 개의 관측기만을 사용하기 때문에 실시간 적용이 용이하여 고장허용제어계의 구성이 가능하다. 따라서 직접토크제어되는 유도전동기 구동시스템의 신뢰성 및 성능향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 제안한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 실험결과를 제시하였다.

## 참고 문헌

- [1] Peter 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] 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.
- [4] 이기상, 류지수, "직접토크제어 유도전동기 구동 서보시스템을 위한 장치고장 진단 기법," *전기학회논문지*, Vol. 51D, No.6, 2002.
- [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.