2001년도 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동 추계학술대회 논문집 (2001.11.24)

벡터제어 유도전동기 구동시스템을 위한 센서고장 검출 및 보상

류지수, 이기상
단국대학교 전기공학과

Sensor Fault Detection and Compensation Schemes for Vector Controlled Induction Motor Drives

Ji-Su Ryu, Kee-Sang Lee
Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - In the speed-sensorless induction motor control systems, only a few percents of error in current measurement badly deteriorates the control performance. And early detection and accomodation of the faults of current sensor is very important to enhance the reliability of the induction motor control system. In this paper, we propose two sensor fault detection schemes having desired functions; fault detection, isolation of failed sensor and compensation of fault effect. The two schemes operate in real-time and employ EKFs (Extended Kalman Filter) for residual generation. Simulation results show that the proposed schemes are very useful in maintaining the control performance of the induction motor driven servo systems even in the face of sensor faults

1. 서 론

유도전동기의 정밀급 서보제어에는 대부분 벡터제어기법이 채택되고 있다. 이 제어방식을 채택한 속도 제어시스템에서 속도센서는 필수적인 요소이지만, 최근에는 제어시스템의 경제성 개선을 위해 속도센서 없이 유도전동기를 제어하려는 연구가 진행되어 왔다. 이 센서리스제어는 상태관측자 또는 칼만필터를 도입함으로서 전류 측정치에 근거하여 속도와 자속을 추정하고 이들 추정치를 제어입력 결정에 이용하는 방식이다[1]. 이러한 시스템에서 전류센서의 고장은 상태추정 오차를 발생시켜 잘못된 제어입력을 생성하는 원인이 되며, 결과적으로 제어성능의 감퇴 또는 제어불능 상태를 초래하게 된다. 따라서 유도전동기 구동 서보계를 위한 전류센서의 실시간 고장검출과 보상 능력을 가진 고장허용시스템의 도입은 다양한 유도전동기에 의한 구동되는 많은 자동화 공정의 성능과 신뢰성 향상에 크게 기여한다 [1-3].

본 논문에서는 속도센서 없는 유도전동기 제어시스템의 신뢰성 향상을 위하여 전류센서의 고장을 검출 식별하고 센서고장이 발생한 경우에도 정확한 속도정보를 확보함으로서 제어성능의 감퇴 없이 서보시스템의 운전을 계속할 수 있는 고장검출보상시스템을 제안한다. 제안된 SFDIS (Sensor Fault Detection and Isolation Scheme)는 두가지 구성으로 실현되며 센서고장의 검출은 유도전동기의 상전류의 평형성을 고려하여 검출한다. 두가지 구성은 모두 고장센서 식별 이후 정상적인 센서만에 의하여 구동되는 확장칼만필터(EKF)만을 사용함으로서 전체 제어계가 전류센서고장에 대한 고장허용성을 갖게 한다.

2. 확장칼만필터를 위한 유도전동기 모델

본 논문에서는 고장의 식별을 위한 잔차발생에 EKF를 이용한다. EKF 알고리즘과 기호는 부록에 정리하였다. 유도전동기의 모델로는 다음과 같은 2상 정지좌표계에서의 모델을 이용한다.

$$\boldsymbol{x}(t) = [\, i_{as} \;\; i_{\beta s} \;\; \lambda_{ar} \;\; \lambda_{\beta r} \;\; \omega_m \,]^T \tag{1}$$

여기서, i_{as}, $i_{\beta s}$는 고정자 전류, λ_{ar}, $\lambda_{\beta r}$는 회전자 자속, ω_m는 기계 각속도이다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t) + \boldsymbol{G}(t)\, \boldsymbol{W}(t) \tag{2}$$

식(2)에서

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t)$$

$$= \begin{bmatrix} -\gamma x_1 + \dfrac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} x_3 + \dfrac{p \cdot L_m}{2\sigma L_s L_r} x_4 x_5 + \dfrac{1}{\sigma L_s} v_{ds}^s \\ -\gamma x_2 - \dfrac{p \cdot L_m}{2\sigma L_s L_r} x_3 x_5 + \dfrac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} x_4 + \dfrac{1}{\sigma L_s} v_{qs}^s \\ \dfrac{R_r}{L_r} L_m x_1 - \dfrac{R_r}{L_r} x_3 - \dfrac{p}{2} x_4 x_5 \\ \dfrac{R_r}{L_r} L_m x_2 + \dfrac{p}{2} x_3 x_5 - \dfrac{R_r}{L_r} x_4 \\ \mu(x_1 x_4 - x_2 x_3) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{W}(t) = [\, w_1(t) \;\; w_2(t) \;\; T_L(t) \,]^T \tag{4}$$

$$\boldsymbol{G}(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{J_m} \end{bmatrix} \tag{5}$$

이고, 식(3)에서

$$\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r, \quad \gamma = (\, L_r^2 R_s + L_m^2 R_r) / \sigma L_s L_r^2,$$
$$\mu = 3/2 \cdot p/2 \cdot L_m / L_r J_m$$

이며, 식(4)에서 $w_1(t)$, $w_2(t)$는 α축, β축의 전원에 포함되는 고조파 성분이고, $T_L(t)$은 부하토크이다.

$$F_x=\begin{bmatrix} -\gamma & 0 & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} & \frac{p\cdot L_m}{2\sigma L_s L_r}x_5 & \frac{p\cdot L_m}{2\sigma L_s L_r}x_4 \\ 0 & -\gamma & -\frac{p\cdot L_m}{2\sigma L_s L_r}x_5 & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} & -\frac{p\cdot L_m}{2\sigma L_s L_r}x_3 \\ \frac{R_r}{L_r}L_m & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{p}{2}x_5 & -\frac{p}{2}x_4 \\ 0 & \frac{R_r}{L_r}L_m & \frac{p}{2}x_5 & -\frac{R_r}{L_r} & \frac{p}{2}x_3 \\ -\mu x_4 & \mu x_3 & \mu x_2 & -\mu x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H_x=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 센서고장의 영향

제어시스템에 사용되는 센서는 잡음, 이득변화, 바이어스 변화 등에 영향을 받으며, 단속이나 개방이 발생할 수 있다. 궤환제어계에서 센서로부터 측정된 정보는 제어입력을 결정하기 위하여 사용되기 때문에 센서고장은 제어시스템의 성능감퇴의 큰 요인이 된다.

적용대상인 속도센서 없는 유도전동기 제어계에서는 전류를 센서로 측정하고, EKF로부터 추정된 상태값들을 제어입력 결정에 사용한다. 이 경우 전류센서의 고장은 EKF의 추정오차를 발생시켜 전류제어기, 자속제어기, 속도제어기 모두의 성능에 악영향을 주며, 궁극적으로 전체 속도제어 시스템의 속도 추적 성능을 감퇴시킨다. 본 연구에서 채택한 유도전동기 속도제어 시스템의 경우, 불과 수% 정도의 단일 전류센서 고장(bias)이 발생한 경우에도 비교적 큰 맥동이 발생하여 정속 제어가 불가능하였다.

4. 센서고장 검출 및 식별 시스템(SFDIS)

본 절에서는 두가지 구조의 SFDIS를 제안한다. 그중 한 구조는 고장의 식별을 위한 정보의 다중성을 확보하기 위하여 다중의 상태추정기를 도입한 구조이며, 다른 구조는 다중 추정기 구조의 실시간 적용의 어려움을 해소하기 위하여 단일 추정기를 적용하면서 식별정보의 추출을 가능케 한 구조로서 다소의 검출지연이 허용되는 초기고장의 검출 및 식별에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

4.1 다중 EKF 구조의 SFDIS

다중관측자 구조의 SFDIS는 측정 출력 중에서 선택된 관측자입력과 시스템변수의 가관측 조건에 따라 DOS (dedicated observer scheme) 또는 GOS(gneralized observer scheme) 등의 다양한 구조로 설계될 수 있다[4]. 제안된 SFDIS는 각 3상의 전류센서(3개)의 고장검출과 식별을 위해 3개의 EKF를 병렬로 구동하는 방식이다. 각 EKF에 투입되는 상전류 측정치는 고장센서의 식별을 위해 표 1과 같이, 각 EKF에서 어느 2상만이 실제 측정치가 투입되고 나머지 한 상은 상평형성에 의해 계산하여 투입한다. EKF의 또 다른 입력인 v_{as}, $v_{\beta s}$는 측정하지 않고, 인버터의 지령치 v_{as}^*, $v_{\beta s}^*$를 사용한다. 이것은 공간벡터 PWM기법을 사용하는 경우 타당한 방법이다.

표 1. 각 EKF의 투입 전류.

Input to EKF(i)	상전류
TIS(1)	i_{am}, i_{bm}, $i_c=-(i_{am}+i_{bm})$
TIS(2)	i_{bm}, i_{cm}, $i_a=-(i_{bm}+i_{cm})$
TIS(3)	i_{am}, i_{cm}, $i_b=-(i_{am}+i_{cm})$

위에서 TIS(i)는 i번째 EKF의 입력을 의미하며, i_{xm}은 상전류의 측정치임을 표시한다.

고장검출 식별을 위한 잔차를 다음과 같이 정의하자.

잔차 :

$$\begin{aligned} r_1 &= |\, i_{asm}^1 - \hat{i}_{as}^{\,1} \,| + |\, i_{\beta sm}^1 - \hat{i}_{\beta s}^{\,1} \,| \\ r_2 &= |\, i_{asm}^2 - \hat{i}_{as}^{\,2} \,| + |\, i_{\beta sm}^2 - \hat{i}_{\beta s}^{\,2} \,| \\ r_3 &= |\, i_{asm}^3 - \hat{i}_{as}^{\,3} \,| + |\, i_{\beta sm}^3 - \hat{i}_{\beta s}^{\,3} \,| \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $i_{xsm}{}^1$, $i_{xsm}{}^2$, $i_{xsm}{}^3$은 각각 TIS의 2상 정지좌표계 표현이며, $\hat{i}_{xs}{}^1$, $\hat{i}_{xs}{}^2$, $\hat{i}_{xs}{}^3$은 각각 EKF1, EKF2, EKF3에 의해서 추정된 고정자 전류이다.

먼저 고장의 검출에는 유도전동기의 3상 전류의 평형방정식에 근거한 다음의 검출 규칙을 사용한다.

검출규칙 :

IF $((i_a+i_b+i_c)>\text{th})$ **THEN fault**
ELSE normal

식(8)에서 잔차 r_1은 i_c의 측정치와 무관하므로 i_c 센서 고장에 영향을 받지 않으며, 유사하게 r_2는 i_b, r_3는 i_a 센서 고장에 영향을 받지 않으므로 다음과 같은 식별규칙이 성립된다.

식별규칙 :

IF $(r_1>\text{th}_1$ AND $r_2>\text{th}_2$ AND $r_3<\text{th}_3)$
THEN i_a **sensor fault**
IF $(r_1>\text{th}_1$ AND $r_2<\text{th}_2$ AND $r_3>\text{th}_3)$
THEN i_b **sensor fault**
IF $(r_1<\text{th}_1$ AND $r_2>\text{th}_2$ AND $r_3>\text{th}_3)$
THEN i_c **sensor fault**

4.2 단일 EKF 구조의 SFDIS

전술한 다중 EKF구조 SFDIS의 가장 큰 문제점은 고장검출시 식별정보를 추출하기 위해서 3개의 EKF를 병렬적으로 구동해야 하지만, 한개의 DSP를 사용할 경우 샘플링시간 내에서 3개의 EKF알고리즘을 순차적으로 적용해야 하므로 계산시간이 문제시 된다는 점이다. 본절에서는 다중 EKF구조 SFDIS에 사용된 3개 EKF의 입출력 변수가 모두 같고 동일한 구조를 가지고 있다는 점에 착안하여 단일 EKF 구조의 SFDIS를 제안한다. 이 SFDIS는 한 개의 EKF에 미리 계획된 순서에 의해 TIS(i)를 투입함으로서 고장식별 정보를 추출한다. TIS의 투입계획의 예는 다음과 같다. 고장검출 후 다음 과정에 의한 식별을 원한다고 가정한다.

(1) a,b상 고장과 c상 고장의 식별
  - c상 고장이면 마침
(2) a상 고장과 b상 고장의 식별

위의 경우 1단계 입력은 TIS(1)이다. 잔차가 임계치보다 작으면 c상 고장, 크면 a,b상 고장이다. 후자의 경우에는 TIS(2)를 투입한다. 잔차가 임계치보다 작으면 a상 고장, 크면 b상 고장임을 쉽게 알수 있다. 이 구조의 특징은 식별 과정이 설계자에 의해 조정될 수 있다는 점이다.

5. 시뮬레이션

제안된 두가지 고장검출식별기법의 유용성을 입증하기 위하여 정격2.2[kW]의 4극 3상 유도전동기[5]를 위한 벡터제어시스템을 대상으로 두가지 구조의 센서고장검출식별시스템을 구성하고 시뮬레이션 결과를 검토하였다.

5.1 다중 EKF 구조 SFDIS

각 EKF의 공분산은 다음과 같이 선정하였으며, 공분산에서 해당하는 채널의 값이 크다는 것은 불확실성을 크게 허용하는 것이다. 고장진단을 위하여 사용되는 EKF는 고장에는 예민하고 외란에는 둔감해야 하며, 이러한 특성은 공분산을 적절히 선정함으로서 어느정도 확보할 수 있다. 아래에서 전류 채널에 해당하는 Q값은 고장에 대한 민감성을 증가시키기 위하여 작게 선정하였으며, 속도 채널에 해당하는 값은 부하에 대하여 둔감하게 하기 위하여 크게 선정하였다.

$$P=\begin{bmatrix} 450 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 450 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \end{bmatrix}$$

$$Q=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100000 \end{bmatrix} \qquad R=\begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

전류제어기와 EKF는샘플링 주기는 100[μsec]이며, 속도제어기는 2[msec]의 샘플링주기를 가진다. 고장 시나리오는 i_a센서에 1[A]의 바이어스를 1.5[sec]에 투입하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 바이어스 고장이 발생하면 토크 리플이 커지고 결과적으로 속도리플이 증가한다. 그림2 (a)는 다중 EKF 구조 SFDIS를 이용하여 고장허용제어를 수행하였을 때의 제어성능을 보여주고 있다. 리플이 잠시 발생하였다가 원상 복구되어 고장에도 불구하고 속도 기준치를 잘 추종하고 있다. 그림2(b)는 고장시 잔차를 나타내며, 4.1절에서 언급하였듯이 r_3은 변화가 없고 r_1, r_2는 증가하였다. 그림2(c)는 고장을 표시하는 플래그이다.

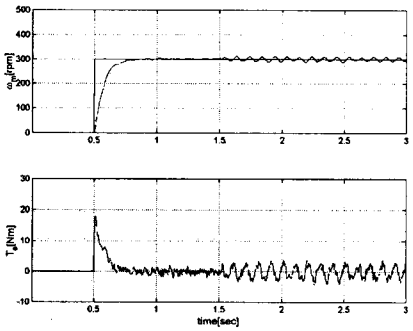
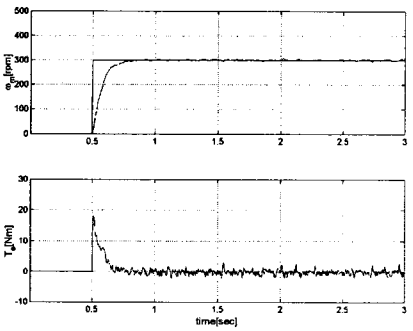
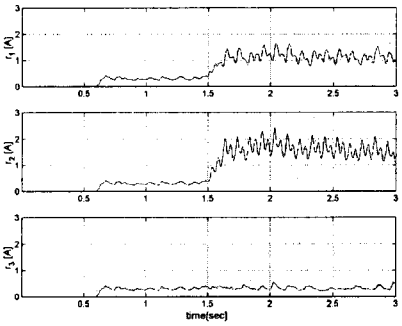


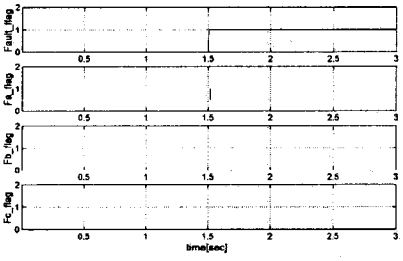
그림 1. i_a 센서고장시 제어성능



(a) 고장허용제어시의 제어성능



(b) i_a 센서고장시 잔차.

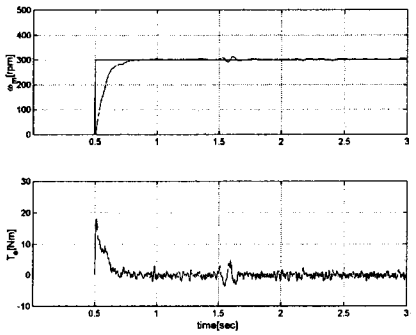


(c) 고장 플래그

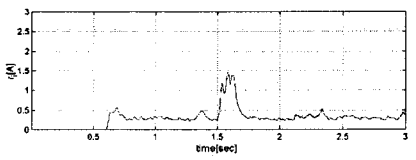
그림 2. 다중 EKF 구조 SFIDS의 고장 검출 보상 성능

5.2 단일 EKF 구조 SFDIS

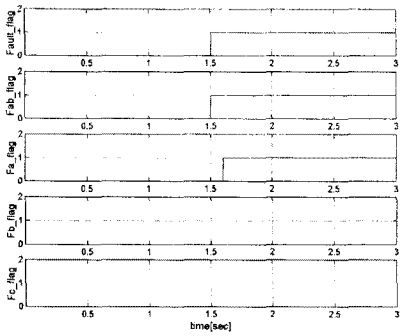
그림3은 단일 EKF 구조 SFDIS 및 이를 포함한 벡터제어 유도전동기 구동장치의 제어특성이다. 그림3(a)는 센서고장시 속도제어특성으로 고장으로 인한 속도리플의 발생과 고장식별 후의 보상효과를 보여주며, 그림3(b)는 잔차의 변화 그리고 그림3(c)는 고장센서의 식별과정을 나타낸다.



(a) 고장허용제어시의 제어성능



(b) i_a 센서고장시 잔차



(c) 고장 플래그

그림3. 단일 EKF구조 SFDIS의 검출 보상 성능

그림3(c)로부터 (a,b)상 고장과 c상 고장의 식별에 0.05[sec] 정도의 시간이 소요되고 a상 고장과 b상고장의 식별에 0.1[sec]정도의 식별지연이 발생하며, 따라서 고장의 보상은 고장 발생 후 0.1[sec] 이후에 이루어짐을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 속도제어시스템을 위해 두가지 형태의 모델기반 고장 검출진단기법을 제안하였다. 제안한 고장 검출진단 시스템은 전류센서의 고장을 검출 식별하고 센서고장이 발생한 경우에도 정확한 속도, 자속 등의 중요 상태변수정보를 제공함으로서 고장허용제어가 가능하므로 속도센서 없는 유도전동기 제어계의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 제안된 두 기법에서 센서고장의 검출은 유도전동기의 상전류의 평형성에 근거하여 수행되며, 두 기법은 고장센서의 식별정보를 추출하는 방법에 따라 다중 EKF구조와 단일 EKF구조로 구분된다. 검출식별과 보상의 신속성의 관점에서는 다중방식이 유리하며, 실시간 적용의 관점에서는 단일 EKF구조가 유리하다. 시뮬레이션 결과는 두 기법의 측정장치 고장 검출식별 성능과 고장이 발생한 경우 고장검출식별 및 진단기법을 적용한 유도전동기 구동장치의 고장허용 제어성능이 매우 우수함을 보여준다.

부 록

속도추정을 위하여 적용한 확장칼만필터[6] 알고리즘을 전개하기위하여 다음과 같은 비선형 상태방정식을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t),u(t),t)+G(t)W(t) \\ z(k) &= h(x(k),k)+V(k) \end{aligned} \tag{a1}$$

EKF를 이용한 상태 추정 문제는 측정벡터 $z(k)$에 근거하여 상태벡터 $x(k)$를 추정하는 것이며 그 과정은 다음과 같다.

단계1. 상태 추정벡터의 예측:

$$\hat{x}(k+1\mid k)=\hat{x}(k\mid k)+\int_{t_k}^{t_{k+1}} f(\hat{x}(t\mid t_k),u(t),t)dt \tag{a2}$$

단계2. 측정벡터 예측:

$$\hat{z}_{k+1}=h(\hat{x}(k+1\mid k),u(k+1),k+1) \tag{a3}$$

다음과 같은 근사식을 정의하면

$$F_x(x(t),u(t),t)=\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \tag{a4}$$

$$H_x(x(t),u(t),t)=\left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \tag{a5}$$

상태천이행렬은 다음과 같고, T_s는 샘플링주기 이다.

$$\Phi(k+1,k)=e^{(F_x(k)T_s)} \tag{a6}$$

단계3. 공분산 전파(covariance propagate):

$$P(k+1,k)=\Phi(k+1,k)P(k,k)\Phi^T(k+1,k)+Q_d(k) \tag{a7}$$

여기서 $Q_d(k)=G(t)Q(t)G^T(t)T_s$이다

단계4. 이득 정정(gain update):

$$\begin{aligned} K(k+1)=P(k+1,k)H_x^T(k+1)\times \\ [H_x(k+1)P(k+1,k)H_x^T(k+1)+R_d(k+1)]^{-1} \end{aligned} \tag{a8}$$

여기서 $R_d(k+1)=R(t)/T_s$이다.

단계5. 공분산 정정(covariance update):

$$P(k+1,k+1)=[I-K(k+1)H_x(k+1)]P(k+1,k) \tag{a9}$$

단계6. 상태 추정치 정정(state update):

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1,k+1) = \hat{x}(k+1,k)+K(k+1)[z(k+1) \\ -\hat{z}(k+1)] \end{aligned} \tag{a10}$$

[참 고 문 헌]

[1] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Science Pub., 1998.

[2] S. M. Bennett, R. J. Patton and S. Daley, "Using a bilinear motor model for a sensor fault tolerant rail traction drive," *The IFAC Sym. SAFEPROCESS' 97*, pp. 783-788, 1997.

[3] M. Chow, P. M. Mangum, and S. O. Yee, "A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 38, no. 6, pp. 446-453, 1991.

[4] 류지수, 이기상, "속도센서 없는 유도전동기 구동장치를 위한 전류센서 고장검출 기법," *한국자동제어학술회의 논문집 C권*, pp. 140-143, 1999.

[5] 금원일, 류지수, 이기상, "폐루프 자속관측기를 이용한 유도전동기의 직접토크제어," *대한전기학회 하계학술대회 논문집 B권*, pp. 1046-1049, 2000.

[6] M. S. Grewal, and A. P. Andrews, *Kalman filtering theory and practice*, Prentice-Hall Inc., 1993.