

유도전동기 드라이브 시스템에서 센서 고장효과 분석

(Analysis of Sensor Fault Effect in Induction Motor Drives)

이기상* · 류지수

(Kee - Sang Lee · Ji - Su Ryu)

요 약

벡터제어와 직접토크제어는 유도전동기를 위한 고성능 제어기법으로서 매우 잘 알려져 있으며, 이들 제어알고리즘을 이용하여 속도 혹은 위치제어를 수행하기 위해서는 전동기의 속도와 회전자 자속 혹은 고정자 자속에 대한 정보가 필요하다. 일반적으로 속도는 엔코더를 이용하여 측정하고, 회전자 혹은 고정자 자속은 전동기의 파라미터와 측정된 전류에 근거하여 추정된다. 제어시스템에서 센서 고장이 발생하면 잘못된 제어 입력이 생성되며 결과적으로 전체 시스템의 제어성능이 감퇴되는 원인이 될 수 있다. 본 논문에서는 유도전동기 드라이브 시스템에서 센서고장이 전동기변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적인 방법과 시뮬레이션에 의하여 분석한다. 제시된 분석결과는 유도전동기 드라이브의 신뢰성 향상을 위한 고장검출식별 기법의 개발시 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

High performance induction motor drives are driven by two advanced control methods: vector control and direct torque control (DTC). In order to apply the control methods to the speed/ position control systems, the informations on rotor speed and rotor or stator flux are required. The speed is measured by encoder, and the rotor or stator flux is estimated by using the motor parameters and measured currents. The control input generated on the basis of the information that is provided by abnormal sensors should be far from the desired value and deteriorates the overall control performance. In this paper, the effects of sensor faults on the motor variables and the control performance of induction motor drives are analyzed by both theoretical approach and simulation study. The presented analysis results could be utilized for the purpose of developing a fault detection and isolation scheme in induction motor drives.

Key Words : Vector control, Direct torque control, Induction motor, Sensor faults, Fault detection and isolation scheme

1. 서 론

* 주저자 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수, 공학박사
Tel : 02-709-2575, Fax : 02-795-8771
E-mail : keesang@dku.edu
접수일자 : 2003년 7월 18일
1차심사 : 2003년 7월 25일
심사완료 : 2003년 8월 14일

마이크로프로세서와 제어기술의 발전으로 각종 산업용 플랜트에서 유도전동기 구동 서보시스템의 적용이 크게 증가하고 있다. 유도전동기의 고성능 제어기법으로서 벡터제어기법과 직접토크제어기법이 많이 이용되고 있다. 이와 같은 유도전동기 제어

기법을 이용하여 유도전동기의 속도 또는 위치제어를 수행하기 위해서는 회전자의 속도정보와 고정자 혹은 회전자 자속정보를 필요로 한다. 속도정보 취득을 위해서는 엔코더를 사용하고, 고정자 및 회전자 자속정보는 측정된 상전류와 전동기의 파라미터를 이용하여 추정한다[1]. 따라서 엔코더와 전류센서의 이상은 잘못된 제어입력을 발생시키는 원인이 되며 전체 제어시스템의 성능 저하를 초래하게 된다. 센서의 이상으로 발생하는 제어성능 저하는 전동기 자체의 고장으로 발생하는 성능저하 보다 심각하다 [2, 3].

본 논문의 목적은 벡터제어기법 및 직접토크제어 기법으로 제어되는 유도전동기 구동장치에서 센서 고장의 전과경로 및 고장효과를 명확히 함으로서 유도전동기 구동시스템의 신뢰성 향상을 위한 고장검출 및 진단기법의 개발시 필요한 기초 자료를 제공하는 것이다. 이를 위해서 유도전동기 구동장치에서 엔코더, 전류센서의 고장이 각 변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적인 방법 및 시물레이션에 의하여 체계적으로 분석 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 유도전동기의 수학적 모델에 대하여 기술하였으며, 3장에서는 벡터제어 및 직접토크제어되는 유도전동기 시스템에서 전류센서 및 엔코더 고장이 제어 변수에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 4장에서는 시물레이션 결과를 분석 검토하였고, 마지막으로 5장에서는 결론을 기술하였다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

일반적으로 3상 유도전동기의 모델은 고정자 기준 2상 α - β 정직좌표계로 변환하여 표현하는 것이 편리하다. 3상 변수는 식(1)과 같이 고정자 기준 α - β 정직좌표계로 변환된다.

$$f^f = f_\alpha + jf_\beta = \frac{2}{3}(f_a + f_b e^{\frac{2\pi}{3}} + f_c e^{-\frac{2\pi}{3}}) \quad (1)$$

고정자 기준 α - β 정직좌표계에서 유도 전동기

의 모델은 다음과 같다.

$$v_s^s = R_s i_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt} \quad (2)$$

$$0 = R_r i_r^s + \frac{d\lambda_r^s}{dt} - j\omega_r \lambda_r^s \quad (3)$$

$$\lambda_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s \quad (4)$$

$$\lambda_r^s = L_m i_s^s + L_r i_r^s \quad (5)$$

여기서 위 첨자 s 는 고정자 기준 정직좌표계를 의미하며, 아래 첨자 s 와 r 은 고정자와 회전자를 표시하고, 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[1].

위와 같이 유도전동기를 2상 정직좌표계에서 표현하면 독립변수의 수가 감소하여 보다 취급하기 간편하게 되지만, 각 변수들이 아직 정현파 교류이므로 취급하기 어렵다. 따라서 동기속도(ω_e)로 회전하는 동기좌표계에서 유도전동기를 표현하면 각 변수들이 직류성분으로 되어 취급하기 편리해진다. 식(2)에서 식(5)에 다음과 같은 회전좌표변환

$$\begin{bmatrix} f_d^a \\ f_q^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

을 적용할 수 있다. 여기서 $\theta_e = \omega_e t$ 는 α 축에 대한 d 축의 회전각위치이다. 그러면 동기좌표계에서 유도전동기 모델은 다음과 같이 된다[1].

$$v_s^e = R_s i_s^e + \frac{d\lambda_s^e}{dt} + j\omega_e \lambda_s^e \quad (7)$$

$$0 = R_r i_r^e + \frac{d\lambda_r^e}{dt} + j\omega_{sl} \lambda_r^e \quad (8)$$

$$\lambda_s^e = L_s i_s^e + L_m i_r^e \quad (9)$$

$$\lambda_r^e = L_m i_s^e + L_r i_r^e \quad (10)$$

여기서 위첨자 'e'는 동기좌표계를 의미하며, $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$ 은 슬립 각속도이다.

3. 유도전동기 제어시스템에서 센서 고장효과

유도전동기의 고성능 제어기법으로서 벡터제어기법과 직접토크제어기법이 잘 알려져 있으며, 이와 같은 제어기법의 실현을 위해서는 전류센서 및 엔코더를 필요로 한다. 본 장에서는 이들 센서가 고장으로 인하여 잘못된 정보를 제공하는 경우 제어알고리즘에 미치는 영향을 분석한다.

3.1 벡터제어시스템

벡터제어는 유도전동기의 정밀제어기법으로서 비선형성으로 인한 제어의 어려움을 극복하기 위하여 고정자 전류를 토크성분과 여자성분으로 분리제어(decoupling control)하는 방법이다. 전류의 분리제어를 위해서는 고정자 전류를 동기좌표계로 변환해야 한다. 간접 벡터제어되는 유도전동기 제어시스템의 전체적인 구조는 그림 1과 같다.

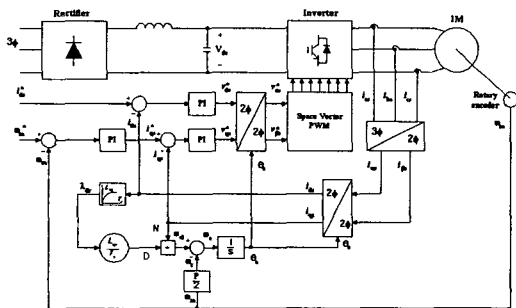


그림 1. 간접 벡터제어계의 구성도
Fig. 1. Block diagram of the indirect vector control system

간접 벡터제어방식에서는 자속 각위치를 고정자 전류와 회전자 속도의 측정치를 이용하여 다음 과정에 의하여 계산한다[1, 2].

단계 1. 전류제어루프에서 전류 i_{as} , i_{bs} 및 i_{cs} 를 측정한다.

단계 2. 3상-2상 변환과 정지-동기 변환을 이용하여 i_{qs} 및 i_{ds} 를 계산한다.

단계 3. 2상 동기좌표계에서의 자속전류 i_{ds} 에 근거하여 회전자 쇄교자속의 d 축 성분 λ_{dr} 를 계산한다.

$$T_r \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (11)$$

여기서 $T_r=L_r/R_r$ 은 회전자 시정수이다.
단계 4. 슬립 각속도를 구한다.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}} \quad (12)$$

단계 5. 자속 각속도는 측정된 전동기의 회전 각속도에 슬립 각속도를 더한 값이며, 이 자속 각속도와 고정자의 α 축을 기준으로 한 d 축의 회전각 즉, 자속각은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (13)$$

3.1.1 전류센서 고장의 효과

전류센서에서는 오프셋, 이득변화, 잡음, 단선 등의 고장이 발생할 수 있다[4]. a 상과 b 상 전류를 측정하고 c 상 전류는 $i_{cs} = -(i_{as} + i_{bs})$ 로 계산하여 얻는다고 가정하자. 이와 같은 경우 정지좌표계에서 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_{as} = I_a \sin(\omega_e t) \quad (14)$$

$$i_{bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin(\omega_e t) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \quad (15)$$

위 식에서 $\theta_e = \omega_e t$ 의 관계를 적용하고, 이들 전류를 동기좌표계로 변환하면

$$i_{ds} = \cos \theta_e I_a \sin \theta_e + \sin \theta_e \left[\frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin \theta_e + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \right] \quad (16)$$

$$i_{qs} = -\sin \theta_e I_a \sin \theta_e + \cos \theta_e \left[\frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin \theta_e + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \right] \quad (17)$$

가 된다.

경우 1 : i_a 센서에 오프셋이 존재하는 경우

이 경우 i_a 의 측정치는 식(18)과 같이 표현된다[3].
앞으로의 전개에서 위 첨자 'm'은 측정치이거나 측
정치가 개입되어 계산된 변수를 나타낸다.

$$i_{as}^m = I_a \sin(\omega_e t) + I_{offset} \quad (18)$$

식(18)의 결과를 식(14), (15)에 적용하면 정지좌
표계의 전류표현은

$$i_{as}^m = I_a \sin(\omega_e t) + I_{offset} \quad (19)$$

$$i_{\beta s}^m = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a \sin(\omega_e t) + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \quad (20)$$

이 된다. 그리고 동기좌표계의 전류표현은

$$i_{\alpha s}^m = \cos \theta_e (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \sin \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}}(I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (21)$$

$$i_{\beta s}^m = -\sin \theta_e (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \cos \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}}(I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (22)$$

가 된다. 벡터제어 상태에서 일정 자속 제어를 수행
한다고 가정하면, λ_{dr} 은 i_{ds} 가 1차 지연 필터링된 것
이므로 전류센서 고장으로 인한 i_{ds} 의 변화에 크게
영향 받지 않고 λ_{dr} 의 지령치 λ_{dr}^* 에 수렴한다고 볼
수 있다. 이때 토크는

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^* i_{qs} \quad (23)$$

와 같이 되며, P 는 전동기의 극수이다. 식(17)을
식(23)에 대입하여 T_e 를 구하고, 식(22)를 식(23)
에 적용하여 전류센서에 오프셋이 존재할 때의 토크
(T_e^m)를 구한 다음, 그 차인 토크리플

$\Delta T_e = T_e - T_e^m$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^* (-I_{offset}) \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_e + a) \quad (24)$$

여기서 $a = \tan^{-1}\sqrt{3}$ 이다. 식(24)는 전류센서에 오
프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크
리플이 발생함을 의미한다. 따라서 속도에도 토크의
경우와 같은 성분의 리플이 나타난다.

경우 2 : i_a 센서에 이득변화가 발생한 경우

이 경우에 대한 해석방법은 오프셋이 발생된 경우
와 동일하며, 토크리플은 식(25)와 같이 구해진다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (-\epsilon I_a) \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(2\theta_e - a) - \frac{\sqrt{3}}{2}] \quad (25)$$

위 식은 전류센서에 이득변화가 전원주파수의 2
배의 주파수 성분을 가지는 토크리플을 발생시킴을
의미한다.

3.1.2 엔코더 고장의 효과

엔코더는 회로상의 원인이나 사용환경에 따라 고
장이 발생할 수 있으며, 고장이 발생하면 잘못된 속
도정보가 제어알고리즘에 제공된다[5].

간접 벡터제어기법의 경우 회전자 자속의 각위치는
식(13)과 같이 엔코더로부터 측정된 속도와 슬립
속도의 합을 적분하여 계산하므로 엔코더에 측정오
차가 발생하면 회전자 자속의 각위치 추정오차로 나
타난다. 이와 같은 자속각 추정오차는 토크전류, 자
속전류, 자속의 크기추정 및 토크에 영향을 미친다.

엔코더 고장으로 인하여 그림 2와 같이 실제의 자
속각이 계산치보다 큰 경우 ($\theta_e > \hat{\theta}_e$), 즉 자속각 추
정 편차가 $\theta_e^{err} > 0$ 인 경우를 고려해보자. 앞으로의
전개에서 'hat'이 붙은 변수는 엔코더 고장으로 인한
잘못된 속도 측정치에 근거하여 계산된 변수를 의미
한다.

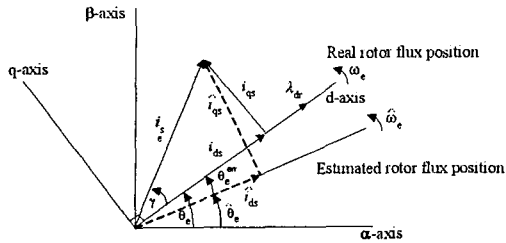


그림 2. 회전자 자속 및 고정자 전류의 벡터도
Fig. 2. Vector diagram of the rotor flux and the stator currents

그림 2로부터 엔코더 고장시 동기좌표계에서 고정자 전류의 실제값과 계산치가 다음의 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\hat{i}_{qs} = \frac{\sin(\gamma + \theta_e^{err})}{\sin \gamma} i_{qs} \quad (26)$$

$$\hat{i}_{ds} = \frac{\cos(\gamma + \theta_e^{err})}{\cos \gamma} i_{ds} \quad (27)$$

정의에 의해 $\gamma \leq 90^\circ$ 이고, γ 와 θ_e^{err} 의 합을 예각으로 가정하면 다음과 같다.

$$\hat{i}_{qs} \geq i_{qs}, \quad \hat{i}_{ds} \leq i_{ds} \quad (28)$$

식(28)은 엔코더 고장시 동기좌표계에서의 토크 전류의 계산치가 실제 값보다 크고, 자속전류는 계산치가 실제 값보다 작게됨을 의미한다. 전동기의 제어 성능에 미치는 영향은 자속각 추정편차의 크기에 따라 다르게 나타나며, 자속각 추정편차가 작은 경우에는 전동기의 속도가 정상적인 경우보다 증가하게 되고 추정편차가 큰 경우에는 제어를 상실할 수 있다.

자속각 추정편차의 영향을 받는 또 다른 변수는 쇄교자속의 d축 성분이다. 쇄교자속의 d축 성분의 계산치는

$$\hat{\lambda}_{dr} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \hat{i}_{ds} \quad (29)$$

이다. 식(29)에서 $p \equiv d/dt$ 이다. 식(29)에 식(27)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{dr} &= \frac{L_m}{T_r p + 1} \frac{\cos(\gamma + \theta_e^{err})}{\cos \gamma} i_{ds} \\ &= \frac{\cos(\gamma + \theta_e^{err})}{\cos \gamma} \lambda_{dr} \end{aligned} \quad (30)$$

가 된다. $\theta_e^{err} > 0$ 및 γ 와 θ_e^{err} 의 합을 예각으로 가정한 경우,

$$\hat{\lambda}_{dr} \leq \lambda_{dr} \quad (31)$$

이 성립한다. 즉, 동기 회전좌표계에서 쇄교자속의 d축 성분의 계산치가 실제값 보다 작음을 알 수 있다.

3.2 직접토크제어시스템

직접토크제어 기법은 동기좌표계로의 변환과정과 전류제어루프가 불필요하며, 토크응답 속도가 빠르고, 비교적 낮은 스위칭주파수로 운전될 수 있는 특징으로 인하여 대형 전동기의 구동에 적합한 방법으로 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다[1, 6]. 직접토크제어시스템의 전체 구성은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보듯이 고정자 자속의 추정이 필요하며, 이것은 식(2)의 변형인 다음 식에 의해 수행된다.

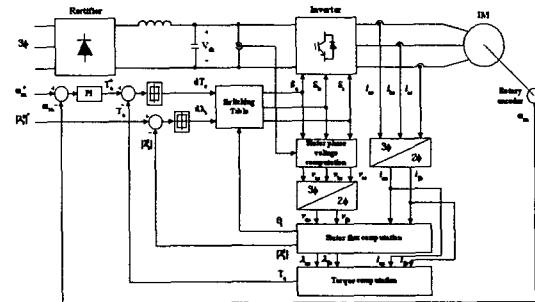


그림 3. 직접토크제어계의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the direct torque control system

$$\lambda_s^s = \int (v_s^s - R_s i_s^s) dt \quad (32)$$

식(32)의 고정자 자속을 α, β 축 성분 분해하고, 다음 식들로부터 고정자 자속의 크기 및 각위치를 계산할 수 있다.

$$|\lambda_s^s| = \sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (33)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{as}} \right) \quad (34)$$

그리고 토크는 측정된 고정자 전류와 추정된 자속을 사용하여

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{as} i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{as}) \quad (35)$$

으로부터 계산한다. 직접토크제어에서는 토크와 고정자 자속의 추정치를 목표치와 히스테리시스 비교하여 전압벡터를 선택함으로써 토크와 자속을 원하는 방향으로 제어한다[1, 6].

3.2.1 전류센서 고장의 효과

경우 1 : i_a 센서에 오프셋이 존재하는 경우

이 경우 전류의 측정치에 대한 정지좌표계 표현은 상술하였듯이 식(14), (15)와 같이 된다. 직접토크제어 상태에서는 자속 크기가 일정하다고 할 수 있으므로 토크 식 (35)를

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \left(\frac{\lambda_{as}}{\sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2}} i_{\beta s} - \frac{\lambda_{\beta s}}{\sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2}} i_{as} \right) \quad (36)$$

와 같이 변형하고, 이 식 (36)에 식 (33)의 관계를 적용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_s^s| (\cos \theta_s \cdot i_{\beta s} - \sin \theta_s \cdot i_{as}) \quad (37)$$

여기서 θ_s 는 고정자 자속의 순시 각위치이다. 식 (14), (15), (19), (20), (37)을 이용하여 토크리플을 구한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_s^s| (-I_{offset}) \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_s - \alpha) \quad (38)$$

식(38)은 전류센서에 오프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크리플이 발생함을 의미한다.

경우 2 : i_a 센서에 이득변화가 발생한 경우

이 경우에 토크리플은 식(39)와 같이 구해지며, 전원주파수의 2배의 주파수 성분을 가지는 토크리플이 발생함을 알 수 있다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_s^s| \epsilon I_a \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(2\theta_s + \alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2}] \quad (39)$$

3.2.2 엔코더 고장의 효과

직접토크제어기법 사용시 엔코더 고장이 발생한 경우, 전동기의 실제 속도는 고장양상에 따라 달라진다. 즉 심각한 측정오차가 발생하면 전체 시스템이 제어를 상실하지만, 그렇지 않은 경우는 기준속도에 대한 정상상태 편차로 나타나며, 엔코더 신호선의 접촉불량의 경우에는 속도특성이 간헐적으로 변화하여 제어목적의 달성이 불가능하다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

제시한 센서고장의 해석결과를 검증하기 위하여 2.2[kW]의 3상 유도전동기를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 유도전동기의 정격 및 파라미터는 참고문헌[4]에 기술되어있다.

4.1 벡터제어시스템

벡터제어기법을 적용하여 정속 운전하는 상태에서 a상 전류센서에 각각 1[A]의 오프셋과 10%의 이득변화를 투입하였다. 그림 4와 5에서 시뮬레이션 결과는 3장의 수학적 해석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우에는 그림 4로부터 전원주파수와 같은 토크리플 및 속도리플이 발생하며, 그림 5로부터 전원주파수의 2배 주파수의 토크리플 및 속도리플이 발생한다. b상 전류센서의 고장 효과는 a상 전류센서의 경우와 유사하므로 생략하였다.

엔코더 고장에 대한 효과를 분석하기 위하여 엔코더 신호선이 단선된 경우와 엔코더로부터의 속도가

유도전동기 드라이브 시스템에서 센서 고장효과 분석

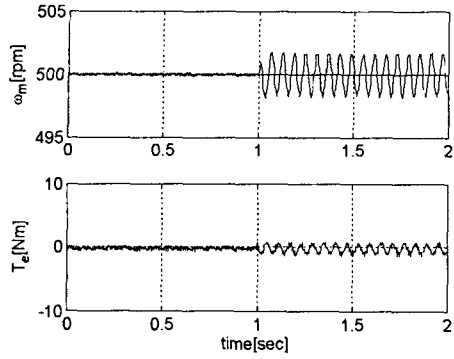


그림 4. 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우의 고장효과 (벡터제어시스템)
 Fig. 4. Effect of the offset in current sensor (Vector control system)

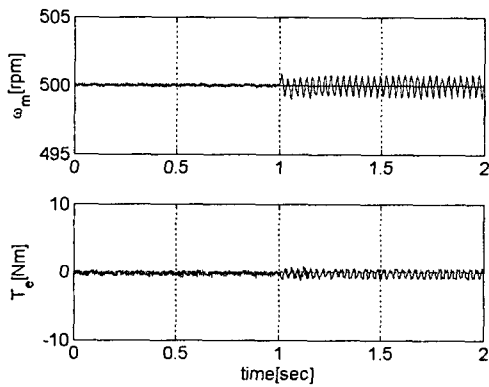


그림 5. 전류센서에 이득변화가 존재하는 경우의 고장효과 (벡터제어시스템)
 Fig. 5. Effect of the gain change in current sensor (Vector control system)

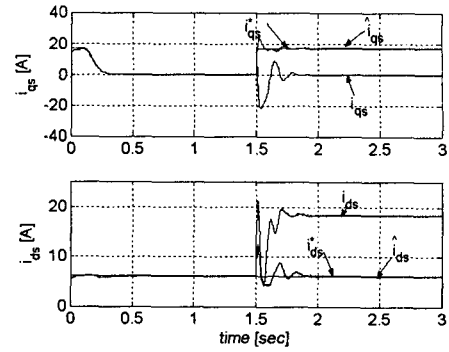
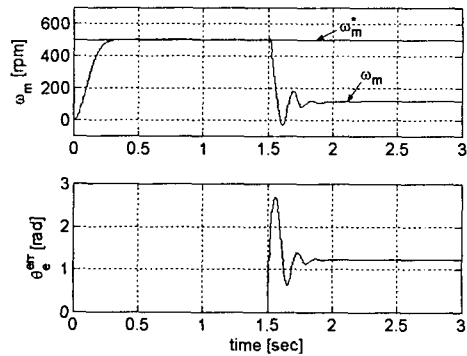


그림 6. 엔코더 신호선의 단선시 고장효과 (벡터제어시스템)
 Fig. 6. Effect of the encoder disconnection (Vector control system)

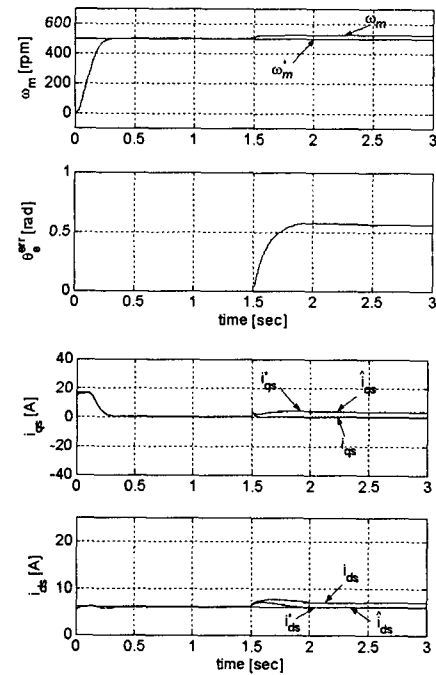


그림 7. 엔코더 이득 5% 감소시 고장효과 (벡터제어시스템)
 Fig. 7. Effect of the fault when the encoder gain is reduced by 5%(Vector control system)

실제 속도보다 5% 낮게 측정되는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6으로부터 엔코더 단선이 발생하면 자속각 추정편차가 발생하게 되며, 부정확한 자속각에 근거하여 변환된 전류가 기준 전

류를 추종하며 실제 전동기 전류는 제어되지 못하므로 결국 속도 제어를 상실함을 알 수 있다. 그림 7로부터 엔코더로부터의 속도가 실제 속도보다 5% 낮게 측정되는 경우는 속도제어기에 잘못된 속도 정보가 투입되어 실제 속도가 5% 증가됨을 알 수 있다.

4.2 직접토크제어시스템

엔코더 신호선 단선시 고장효과 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8로부터 엔코더 신호선이 단선되면 실제 속도는 전동기가 도달할 수 있는 최대가 됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 직접토크 제어기법에서 속도제어기는 단지 토크 기준치를 생성하는 역할을 수행할 뿐이며 제어 알고리즘에서 속도 정보를 필요로 하지 않기 때문에 속도제어기는 현재 속도를 0[rpm]으로 간주하고 최대 토크 기준치를 생성하기 때문이다.

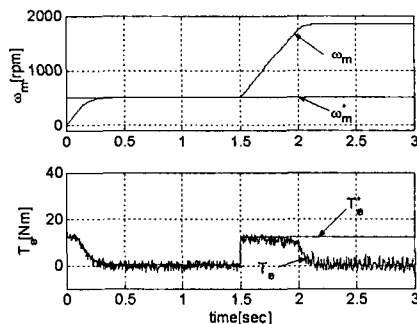


그림 8. 엔코더 신호선의 단선시 고장효과 (직접토크제어시스템)
Fig. 8. Effect of the encoder disconnection (Direct torque control system)

5. 결 론

벡터제어 및 직접토크제어되는 유도전동기 구동장치에서 엔코더, 전류센서의 고장이 각 변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적인 방법 및 시뮬레이션에 의하여 체계적으로 분석하였다. 분석결과에 의하면 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우에는 전류주파수와 같은 주파수를 가지는 토크리플 및 속도리플이, 이득변화가 발생한 경우에는 전류주파수의 2배 주파수를 가지는 토크리플 및 속도리플이 발생한다. 엔코더 고장의 경우는 심각한 측정

오차가 발생하면 전체 시스템이 제어를 상실하지만, 그렇지 않은 경우는 기준속도에 대한 정상상태 편차로 나타난다. 제시된 분석결과는 유도전동기 구동시스템에서 센서 고장의 전파경로 및 고장효과를 명확히 함으로서 유도전동기 구동시스템의 신뢰성 향상을 위한 고장검출 및 진단기법의 개발시 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 2003 학년도 단국대학교 대학연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- (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) S. M. Bennet, R. J. Patton, and S. Daley, "Using a bilinear motor model for a sensor fault tolerant rail traction drives", Proc. of SAFEPROCESS '97, pp. 783-788, 1997.
- (4) K. S. Lee and J. S. Ryu, "Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drives", IEE Proc. Control Theory and Applications, vol. 150, no. 4, 2003.
- (5) 류지수, 이기상, 박태건, "전력 등가관계를 이용한 벡터 제어 유도전동기의 엔코더 고장 해석 및 검출", 전기학회논문지, 52D권, 6호, pp. 333-341, 2003.
- (6) I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 22, no. 5, pp. 820-827, 1986.

◇ 저자소개 ◇

이기상 (李起常)

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

류지수 (柳志帥)

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