

유도전동기 드라이브 시스템에서 센서 고장효과 분석

류지수, 이기상
단국대학교 전기공학과

Analysis of Sensor Fault Effect in Induction Motor Drives

Ji-Su Ryu, Kee-Sang Lee
Dept. of Electrical Eng., Dankook Univ.

Abstract - The effects of sensor faults on motor variables and control performance in induction motor drives are analyzed by both theoretical approach and simulation study. Vector control and direct torque control method for induction motor are well known. To control speed or position, the informations on rotor speed and rotor or stator flux are required in these control algorithms. The speed is measured by encoder, and the rotor or stator flux is estimated using motor parameters and measured currents. The control input generated based on the information from a faulted sensor should be far from the desired value and deteriorates the overall control performance.

1. 서 론

마이크로프로세서와 제어기술의 발전으로 각종 산업용 플랜트에서 유도전동기 구동 서보시스템의 적용이 크게 증가하고 있다. 유도전동기의 고성능 제어기법으로서 벡터제어기법과 직접토크제어기법이 잘 알려져 있다. 이와 같은 유도전동기 제어기법을 이용하여 유도전동기의 속도 또는 위치제어를 수행하기 위해서는 회전자속도 정보와 고정자 혹은 회전자 자속정보를 필요로 한다. 속도 정보 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 제어성능저하는 전동기 자체의 고장으로 발생하는 성능저하 보다 심각하다[2].

본 논문에서는 벡터제어 및 직접토크제어되는 유도전동기 구동장치에서 엔코더, 전류센서의 고장이 각 변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적인 방법 및 시뮬레이션에 의하여 체계적으로 분석 제시한다.

2. 유도전동기 모델

일반적으로 3상 유도전동기의 모델은 고정자 기준 2상 $\alpha\beta$ 정지좌표계로 변환하여 표현하는 것이 편리하다. 3상 변수는 식(1)에 의해 고정자 기준 $\alpha\beta$ 정지좌표계로 변환된다.

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

고정자 기준 $\alpha\beta$ 정지좌표계에서 유도 전동기의 모델은

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

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

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

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

여기서 위 첨자 s 는 고정자 기준 정지좌표계를 의미하며, 아래 첨자 s 와 r 는 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.

위와 같이 유도전동기를 2상 정지좌표계에서 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

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

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].

$$v_d^e = R_s i_d^e + \frac{d\lambda_d^e}{dt} + j\omega_e \lambda_q^e \quad (7)$$

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

$$\lambda_d^e = L_s i_d^e + L_m i_r^e \quad (9)$$

$$\lambda_q^e = L_m i_d^e + L_r i_r^e \quad (10)$$

여기서 위첨자 'e'는 동기좌표계를 의미하며, $\omega_d = \omega_e - \omega_r$ 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 절에서는 이들 센서가 고장으로 인하여 잘못된 정보를 제공하는 경우 제어알고리즘에 미치는 영향을 분석한다.

3.1 벡터제어시스템

3.1.1 전류센서 고장의 효과

전류센서에서는 오프셋, 이득변화, 잡음, 단선 등의 고장이 발생할 수 있다[3]. a상과 b상 전류를 측정하고 c상 전류는 $i_{cs} = -(i_{as} + i_{bs})$ 로 계산하여 얻는다고 가정하

자. 이와 같은 경우 정지 좌표계의 전류표현은 다음과 같이 된다.

$$i_{\alpha} = I_a \sin(\omega t) \quad (11)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin(\omega t) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (12)$$

그리고 위 식에서 $\theta_e = \omega t$ 의 관계를 적용하고, 이들 전류를 동기 좌표계로 변환하면

$$i_{ds} = \cos \theta_e I_a \sin \theta_e + \sin \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin \theta_e + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (13)$$

$$i_{qs} = -\sin \theta_e I_a \sin \theta_e + \cos \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}} I_a \sin \theta_e + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (14)$$

가 된다.

경우 1 : i_a 센서에 오프셋이 존재하는 경우

이 경우 i_a 의 측정치는 참고문헌(3)으로부터 식(15)으로 표현된다. 앞으로의 전개에서 위치자 'm'은 측정치이거나 측정치가 개입되어 계산된 변수를 나타낸다.

$$i_{\alpha}^m = I_a \sin(\omega t) + I_{offset} \quad (15)$$

식(15)의 결과를 식(11), (12)에 적용하면 정지좌표계의 전류표현은

$$i_{\alpha}^m = I_a \sin(\omega t) + I_{offset} \quad (16)$$

$$i_{\beta}^m = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_a \sin(\omega t) + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (17)$$

이 된다. 그리고 동기좌표계의 전류표현은

$$i_{ds}^m = \cos \theta_e (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \sin \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}} (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (18)$$

$$i_{qs}^m = -\sin \theta_e (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \cos \theta_e [\frac{1}{\sqrt{3}} (I_a \sin \theta_e + I_{offset}) + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (19)$$

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

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^* i_{qs} \quad (20)$$

와 같이 되며, 식(13)을 식(20)에 대입하여 T_e 를 구하고, 식(18)을 식(20)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 구한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^* (-I_{offset}) \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_e + \alpha) \quad (21)$$

여기서 $\alpha = \tan^{-1} \sqrt{3}$ 이다. 식(21)은 전류센서에 오프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크리플이 발생함을 의미한다. 따라서 속도에도 토크의 경우와 같은 성분의 리플이 나타난다.

경우 2 : i_a 센서에 이득변화가 발생한 경우

이 경우에 대한 해석방법은 오프셋이 발생된 경우와 동일하며, 토크리플은 식(22)과 같이 구해진다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (-\epsilon I_a) \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(2\theta_e - \alpha) - \frac{\sqrt{3}}{2}] \quad (22)$$

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

3.1.2 엔코더 고장의 효과

엔코더는 회로상의 원인이나 사용환경에 따라 고장이 발생할 수 있으며, 고장이 발생하면 잘못된 속도정보가 제어알고리즘에 제공된다.

간접벡터제어기법의 경우 회전자 자속의 각위치는

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (23)$$

와 같이 엔코더로부터 측정된 속도와 슬립속도의 합을 적분하여 계산하므로 엔코더에 측정오차가 발생하면 회전자 자속의 각위치 추정오차로 나타난다. 이와 같은 자속각 추정오차는 토크전류, 자속전류, 자속의 크기추정 및 토크에 영향을 미친다. 엔코더 고장으로 인하여 그림 1과 같이 실제의 자속각이 계산치보다 큰 경우 ($\theta_e > \hat{\theta}_e$), 즉 자속각 추정 편차가 $\theta_e^{err} > 0$ 인 경우를 고려해보자. 앞으로의 전개에서 'hat'이 붙은 변수는 엔코더 고장으로 인한 잘못된 속도 측정치에 근거하여 계산된 변수를 의미한다.

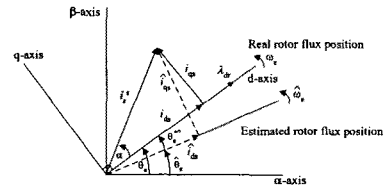


그림 1 회전자 자속 및 고정자 전류의 벡터도

그림 1로부터 엔코더 고장시 동기좌표계에서 고정자 전류의 실제값과 계산치가 다음의 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\hat{i}_{qs} = \frac{\sin(\alpha + \theta_e^{err})}{\sin \alpha} i_{qs} \quad (24)$$

$$\hat{i}_{ds} = \frac{\cos(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos \alpha} i_{ds} \quad (25)$$

정의에 의해 $\alpha \leq 90^\circ$ 이고, α 와 θ_e^{err} 의 합을 예각으로 가정하면

$$\hat{i}_{qs} \geq i_{qs}, \quad \hat{i}_{ds} \leq i_{ds} \quad (26)$$

식(26)에 의하면 엔코더 고장시 동기좌표계에서의 토크전류의 계산치가 실제 값보다 크고, 자속전류는 계산치가 실제 값보다 작게됨을 의미한다.

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

$$\hat{\lambda}_{dr} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \hat{i}_{ds} \quad (27)$$

이 된다. 식(27)에서 $T_r = L_r/R_r$, $p \equiv d/dt$ 이다. 식(27)에 식(25)을 대입하여 정리하면

$$\hat{\lambda}_{dr} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \frac{\cos(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos \alpha} i_{ds} = \frac{\cos(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos \alpha} \lambda_{dr} \quad (28)$$

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

$$\lambda_{dr} \leq \lambda_{dr} \quad (29)$$

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

3.2 직접토크제어시스템

3.2.1 전류센서 고장의 효과

경우 1 : i_a 센서에 오프셋이 존재하는 경우

이 경우 전류의 측정치에 대한 정지좌표계 표현은 상술 하였듯이 식(16),(17)과 같이 된다. 직접토크제어 상태에서는 자속 크기가 일정하다고 할 수 있으므로 토크는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{as} i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{as}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \left(\frac{\lambda_{as}}{\sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2}} i_{\beta s} - \frac{\lambda_{\beta s}}{\sqrt{\lambda_{as}^2 + \lambda_{\beta s}^2}} i_{as} \right) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_d| (\cos \theta_e \cdot i_{\beta s} - \sin \theta_e \cdot i_{as}) \end{aligned} \quad (30)$$

여기서 θ_e 는 고정자 자속의 순시 각위치이다. 식(11), (12),(16)(17),(30)을 이용하여 토크리플을 구한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_d| (-I_{offset}) \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_e - \alpha) \quad (31)$$

여기서 $\alpha = \tan^{-1} \sqrt{3}$ 이다. 식(31)은 전류센서에 오프셋이 존재하면 전원주파수와 같은 주파수의 토크리플이 발생함을 의미한다.

경우 2 : i_a 센서에 이득변화가 발생한 경우

이 경우에 토크리플은 식(32)와 같이 구해지며, 전원주파수의 2배의 주파수 성분을 가지는 토크리플이 발생함을 알 수 있다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} |\lambda_d| \epsilon I_a \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sin(2\theta_e + \alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (32)$$

3.2.2 엔코더 고장의 효과

직접토크제어기법 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(4). 벡터제어기법을 적용하여 정속운전하는 상태에서 각 센서고장들을 투입하였다. 시뮬레이션 결과는 3절의 수학적인 해석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우에는 그림 2로부터 전원주파수와 같은 토크리플 및 속도리플이 발생하며, 엔코더 신호선의 단선시는 그림 3으로부터 제어를 상실함을 알 수 있다. 직접토크제어기법을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 생략하였지만 역시 수학적인 해석결과와 잘 일치함을 확인하였다.

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 전원주파수와 같은 주파수를 가지는 토크리플 및 속도리플이, 이득변화가 발생한 경우에는 전원주파수의 2배 주파수를 가지는 토크리플 및 속도리플이 발생한다. 엔코더 고장의 경우는 심각한 측정오차가 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.

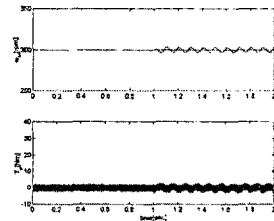


그림 2 전류센서에 오프셋이 존재하는 경우의 고장 효과

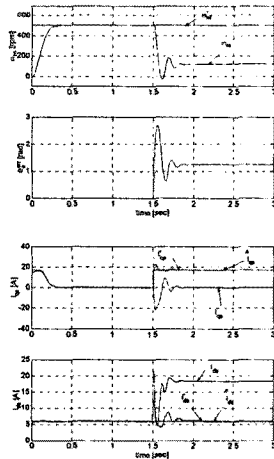


그림 3 엔코더 신호선의 단선시 고장 효과

(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] 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.
- [4] 유지수, 이기상, 박태권, "전력 등가관계를 이용한 벡터제어 유도전동기의 엔코더 고장 해석 및 검출", 전기학회논문지, 52D권, 6호, 2003.