

**벡터제어 유도전동기 구동장치를 위한 패리티 관계식을 이용한
엔코더 고장검출 기법**

박태건, 류지수**, 이기상**
*충북과학기술대학 전자정보과, **단국대학교 전기공학과

**An Encoder Fault Detection Scheme using Parity Equation
for Vector Controlled Induction Motor Drives**

*Tae-Geon Park, Ji-Su Ryu** and Kee-Sang Lee**

*Dept. of Elec. & Inform. Chungbuk Tech. Collodge, **Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

Abstract - In induction motor control systems driven by the indirect vector control scheme, the erroneous measurement of rotor speed results in incorrect flux angle estimate and consequently deteriorates the overall control performance. In this paper the effect of encoder fault on motor variables and control performance is analyzed by both theoretical approach and experimental study. A parity equation based on the power is suggested and applied to detect the incipient fault of encoder.

1. 서 론

유도전동기의 정밀제어를 위한 벡터제어를 실현하기 위해서는 회전자 속도정보와 자속 각위치 정보가 필수적이다. 벡터제어기법은 자속 각위치 정보의 취득 방법에 따라 직접방식과 간접방식으로 분류된다. 이중 많이 적용되는 간접벡터제어 방식에서는 전동기 속도의 측정치를 적분하여 얻은 각위치에 슬립각을 더하여 자속 각위치를 계산한다[1]. 이 제어시스템에서 엔코더 고장은 실제와 다른 회전자의 속도, 각위치 및 슬립 각속도가 제어기에 제공됨을 의미하며, 그 결과 잘못된 제어입력이 발생되어 제어성능의 감퇴 또는 제어불능 상태를 초래하게 된다[2]. 그러므로 유도전동기 구동장치의 신뢰성 향상을 위해서는 측정장치들의 이상을 식별할 수 있는 고장검출기법의 개발이 필수적이다[2-4].

본 논문에서는 간접 벡터제어되는 유도전동기 구동시스템에서 엔코더 고장이 각 변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 수학적 모델을 이용한 해석적 방법 및 시뮬레이션에 의하여 분석한다. 또한 전력방정식에 근거한 패리티 방정식을 유도하고, 이를 이용한 잔차 발생 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 실제적인 적용 가능성을 검토하기 위하여 실시간 제어되는 유도전동기 구동장치에 대하여 적용 실험을 수행한다.

2. 유도전동기 모델 및 벡터제어

2.1 유도전동기 모델

3상 유도전동기는 고정자 기준 2상 α - β 좌표계로 변환하여 표현하는 것이 편리하다. 임의의 3상 변수 f_a, f_b, f_c 는 다음식에 의해 고정자 기준 α - β 좌표계로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

고정자 기준 α - β 좌표계에서의 유도전동기 방정식은

다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_s &= R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \\ 0 &= R_r i_r + \frac{d\lambda_r}{dt} - j\omega_r \lambda_r \\ \lambda_s &= L_s i_s + L_m i_r \\ \lambda_r &= L_r i_r + L_m i_s \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 첨자 s 와 r 은 각각 고정자와 회전자를 표시한다. L_s, L_r, L_m 은 각각 고정자 자기 인덕턴스, 회전자 자기 인덕턴스, 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스이며, R_s, R_r 은 고정자 저항, 회전자 저항이고, ω_r 은 회전자의 전기 각속도이다. 유도전동기의 토크방정식은

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} L_m (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (3)$$

이며, 여기서 P 는 전동기의 극수이다.

2.2 벡터제어

벡터제어란 유도전동기의 정밀제어기법으로서 비선형성으로 인한 제어의 어려움을 극복하기 위하여 고정자 전류를 토크성분과 여자성분으로 분리제어(decoupling control)하는 방법이다. 전류의 분리를 위해서는 유도전동기의 모델을 고정자 기준 정지 좌표계에서 동기 회전 좌표계로 변환할 필요가 있으며 변환식은

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

이다. 여기서 θ_e 는 회전자 자속의 회전각이다. 벡터제어 기법은 이 자속각 (θ_e)의 취득 방법에 따라 직접벡터제어와 간접벡터제어로 구분된다. 간접벡터제어 방식에서는 자속을 측정하지 않고 동기 회전좌표계에서 표현된 고정자 토크전류 i_{qs} 및 자화전류 i_{mr} 로 부터 슬립각속도를 계산하고 여기에 전동기의 회전속도를 더하여 간접적으로 자속 각속도를 구하여 사용한다. 자속각속도를 구하는 과정은 다음과 같다.

- 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 동기 회전좌표계에서의 자속전류 i_{ds} 에 근거하여 자화전류 i_{mr} 를 계산한다.

$$T_r \frac{di_{mr}}{dt} + i_{mr} = i_{ds} \quad (5)$$

여기서 $T_r = L_r/R_r$ 은 회전자 시정수이다.

- 단계 4. 슬립각속도를 구한다.

$$\omega_{sl} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}}{i_{mr}} \quad (6)$$

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.

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad (7)$$

3. 엔코더 고장의 영향

3.1 엔코더 고장의 모델링

로터리 엔코더는 전동기의 회전속도 측정에 사용되며 회로상의 원인이나 사용환경에 따라 측정의 정확성에 문제가 발생할 수 있다. 엔코더 고장은 아래 식과 같이 모델링될 수 있다.

$$\widehat{\omega}_m = (1-\gamma)\omega_m, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (8)$$

여기서 $\widehat{\omega}_m$ 은 회전자 기계적 각속도의 측정치이고, ω_m 은 실제의 기계적 각속도이다. 또한 앞으로 모든 표기에서 hat이 붙은 변수는 측정치이거나 계산치이다. 고장은 수광소자가 차단되어 엔코더의 출력 펄스가 없는 경우($\gamma=1$), 원판의 홀의 차단으로 출력 펄스가 감소된 경우($0 < \gamma < 1$) 및 γ 가 간헐적으로 $[0,1]$ 내의 임의 값을 취하는 경우로 분류된다.

3.2 엔코더 고장의 영향

엔코더 고장이 발생하면 $\omega_r = \widehat{\omega}_r$ 이므로, $\widehat{\omega}_r$ 로부터 계산된 식(4)~식(7)의 결과는 ω_r 에 근거한 계산 결과와 다르게 된다. 먼저 자속각 θ_e 는 식(5)~식(7)을 이산화한 다음 방정식에 의해 계산된다. 아래에서 전류 제어루프의 샘플링 주기는 T_{si} 로 가정하였으며 k 는 $t=kT_{si}$ 를 의미한다.

$$\Delta \theta_e(k) = \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}(k)}{i_{mr}(k)} T_{si} + \frac{P}{2} \Delta \theta_m(k) \quad (9)$$

여기서

$$\Delta \theta_e(k) = \theta_e(k) - \theta_e(k-1) \quad (10)$$

$$\Delta \theta_m(k) = \theta_m(k) - \theta_m(k-1) \quad (11)$$

이며 회전속도 $\widehat{\omega}_r$ 에 근거하여 계산된 자속각 $\widehat{\theta}_e$ 의 표현은 식(9)~식(11)에서 θ_e , i_{qs} , i_{mr} 대신에 $\widehat{\theta}_m$, \widehat{i}_{qs} , \widehat{i}_{mr} 를 대입하여 얻어진다. 엔코더 고장의 경우 $\widehat{\theta}_e$ 와 θ_e 사이에는 오차가 발생한다. 따라서 잘못 계산된 자속각에 근거하여 3상 고정좌표계의 상전류 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 를 좌표 변환한 \widehat{i}_{ds} , \widehat{i}_{qs} 역시 실제의 i_{ds} , i_{qs} 와는 다르게 된다. 또한 실제와는 다른 \widehat{i}_{ds} , \widehat{i}_{qs} 는 자속각 $\widehat{\theta}_e$ 의 계산에 영향을 준다. 엔코더 고장시 θ_e 와 $\widehat{\theta}_e$ 간의 추정 편차 θ_e^{err} 및 추정 편차의 증분 $\Delta \theta_e^{err}$ 은 다음의 이산치 형식으로 표현된다.

$$\Delta \theta_e^{err}(k) = \frac{1}{T_r} \left[\frac{i_{qs}(k)}{i_{mr}(k)} - \frac{\widehat{i}_{qs}(k)}{\widehat{i}_{mr}(k)} \right] T_{si} + \frac{P}{2} [\Delta \theta_m(k) - \Delta \widehat{\theta}_m(k)] \quad (12)$$

여기서

$$\Delta \theta_e^{err}(k) = \theta_e^{err}(k) - \theta_e^{err}(k-1) \quad (13)$$

$$\theta_e^{err}(k) = \theta_e(k) - \widehat{\theta}_e(k) \quad (14)$$

이와 같은 자속각 추정오차는 토크전류, 자속전류, 자화전류 및 토크에 영향을 미친다. 엔코더 고장으로 인하여 그림 1과 같이 실제의 자속각이 계산치보다 큰 경우 ($\theta_e(k) > \widehat{\theta}_e(k)$), 즉 자속각 추정 편차가 $\theta_e^{err}(k) > 0$ 인 경우를 고려해보자.

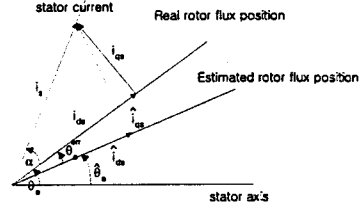


그림 1. 회전자 자속 및 고정자 전류의 벡터도

그림 1로부터 동기 회전좌표계에서 고정자 토크전류 i_{qs} 와 자속전류 i_{ds} 가 이루는 각을 α 라고 하고 자속각의 편차를 θ_e^{err} 이라 하면, 엔코더 고장시 동기 회전좌표계에서의 고정자 전류의 실제값과 계산치에 대한 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\widehat{i}_{qs} = \frac{\sin(\alpha + \theta_e^{err})}{\sin \alpha} i_{qs} \quad (15)$$

$$\widehat{i}_{ds} = \frac{\cos(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos \alpha} i_{ds} \quad (16)$$

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

$$\widehat{i}_{qs} \geq i_{qs}, \quad \widehat{i}_{ds} \leq i_{ds} \quad (17)$$

식(17)는 엔코더 고장시 동기 회전좌표계에서의 토크전류의 계산치가 실제값보다 크고, 자속전류는 계산치가 실제값보다 작게됨을 의미한다. 한편, 자화전류는 식(15)로부터 다음과 같이 구해지며

$$\widehat{i}_{mr} = \frac{1}{T_r p + 1} \widehat{i}_{ds} \quad (18)$$

여기서 $p = d/dt$ 이다. 식(18)에 식(16)을 대입하여 정리하면, $\theta_e^{err}(kt) > 0$ 및 α 와 θ_e^{err} 의 합을 예각으로 가정한 경우,

$$\widehat{i}_{mr} \leq i_{mr} \quad (19)$$

즉, 동기 회전좌표계에서 자화전류의 계산치가 실제값보다 작음을 알 수 있다. 한편, 전동기의 발생 토크의 계산치는 전류 \widehat{i}_{qs} 와 \widehat{i}_{mr} 의 함수로 표현된다. \widehat{i}_{mr} 은 식(18)에서와 같이 계산된 \widehat{i}_{ds} 에 대하여 1차 지연되고, 식(17)에 의하면 엔코더 고장 발생시 계산된 자화전류는 실제의 자화전류보다 작아져, 계산된 토크전류는 실제의 토크전류보다 커지게 된다. 따라서 \widehat{i}_{mr} 은 발생 토크 \widehat{T} 에 크게 기여하지 못하고 발생토크 \widehat{T} 는 주로 토크전류 i_{qs} 에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

4. 패리티 관계식을 이용한 엔코더 고장검출

본 절에서는 엔코더 고장 검출을 위한 전력방정식에 근거한 패리티 관계식을 유도하며 이를 이용한 잔차발생 알고리즘을 제안한다.

4.1 간접벡터제어 적용시 전력 표현

전동기의 전력 관계는 다음 식과 같다.

$$P_{in} = P_{mech} + P_{rotor} + P_{stator} + P_{stored} \quad (20)$$

여기서 P_{in} 는 공급전력, P_{rotor} 및 P_{stator} 는 각각 회전자와 고정자 저항에서 소모되는 전력, P_{stored} 는 자계 저장 전력, P_{mech} 는 기계적 출력을 의미한다. 벡터제어 상대를 가정하면 각각의 전력은 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \mathbf{v}_s \mathbf{i}_s \\ &= v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} \\ &= \frac{3}{2} (v_{as} i_{as} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_{mech} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{1 + \sigma_r} i_{mr} i_{qs} \omega_r \quad (22)$$

$$P_{rotor} = \frac{3}{2} \frac{R_r}{(1 + \sigma_r)^2} i_{qs}^2 \quad (23)$$

$$P_{stator} = \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \quad (24)$$

$$P_{stored} = \frac{3}{2} \{ i_{ds} (v_{ds} - R_s i_{ds}) + i_{qs} (v_{qs} - R_s i_{qs}) \} \quad (25)$$

위에서 식(22)-(25)는 동기 회전좌표계에서의 표현이며 $\sigma_r = L_{lr}/L_m$ 은 회전자 권선의 누설계수이다.

4.2 전력방정식에 근거한 잔차 발생

전력식에 근거하여 엔코더의 고장을 검출하기 위한 잔차(r_p)의 발생식은 다음과 같다.

$$r_p = P_{in} - \hat{P}_{mech} - \hat{P}_{rotor} - \hat{P}_{stator} - \hat{P}_{stored} \quad (26)$$

잔차를 구하기 위해서는 전력의 추정치를 구하여야 한다. 먼저 기계적 출력의 추정치 \hat{P}_{mech} 은 식(22)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_{mech} &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{1 + \sigma_r} \hat{i}_{mr} \hat{i}_{qs} \hat{\omega}_r \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{1 + \sigma_r} \hat{i}_{mr} \hat{i}_{qs} \hat{\omega}_r \\ &\quad \frac{\cos(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos \alpha} \frac{\sin(\alpha + \theta_e^{err})}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (27)$$

회전자 저항에서 소모되는 전력의 추정치 \hat{P}_{rotor} 는 식(23)으로부터,

$$\begin{aligned} \hat{P}_{rotor} &= \frac{3}{2} \frac{R_r}{(1 + \sigma_r)^2} \hat{i}_{qs}^2 \\ &= \frac{3}{2} \frac{R_r}{(1 + \sigma_r)^2} \hat{i}_{qs}^2 \frac{\cos^2(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos^2 \alpha} \end{aligned} \quad (28)$$

으로 구해지며, 고정자 저항에서 소모되는 전력과 자계 전력의 추정식은 식(24),(25)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_{stator} &= \frac{3}{2} R_s (\hat{i}_{ds}^2 + \hat{i}_{qs}^2) \\ &= \frac{3}{2} R_s \left\{ \hat{i}_{ds}^2 \left(\frac{\sin^2(\alpha + \theta_e^{err})}{\sin^2 \alpha} \right) \right. \\ &\quad \left. + \hat{i}_{qs}^2 \left(\frac{\cos^2(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos^2 \alpha} \right) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{stored} &= \frac{3}{2} \{ \hat{i}_{ds} (\hat{v}_{ds} - R_s \hat{i}_{ds}) + \hat{i}_{qs} (\hat{v}_{qs} - R_s \hat{i}_{qs}) \} \\ &= \frac{3}{2} \left\{ \hat{i}_{ds} (v_{ds} - R_s i_{ds}) \left(\frac{\cos^2(\alpha + \theta_e^{err})}{\cos^2 \alpha} \right) \right. \\ &\quad \left. + \hat{i}_{qs} (v_{qs} - R_s i_{qs}) \left(\frac{\sin^2(\alpha + \theta_e^{err})}{\sin^2 \alpha} \right) \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

5. 시뮬레이션

고장해석 결과 및 고장검출 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 표1의 파라미터를 가지는 유도전동기를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

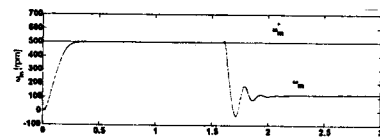
표 1. 유도전동기의 정격 및 파라미터

구 수	4	R_s [Ω]	0.9210
정격출력[kW]	2.2	R_r [Ω]	0.5830
정격전압[V]	220	L_s [H]	0.0671
정격전류[A]	8.6	L_r [H]	0.0671
정격속도[rpm]	1,740	L_m [H]	0.0650
정격토크[N·m]	12.074	J_m [kg·m ² /sec]	0.0418

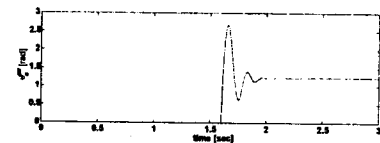
5.1 엔코더 고장의 영향

일정 기준 자속 및 속도 제어시 엔코더 고장의 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 1.6(sec)에서 엔코더 단선이며, 전동기는 무부하 상태에서 기준속도 500(rpm)으로 기동하였다.

그림(a)에서와 같이 엔코더 단선이 발생하면 자속각 추정편차가 발생하게 되고, 그림(b)에서와 같이 계산된 전류가 기준전류를 추종하며 실제 전동기 전류는 제어를 상실한다. 고장 해석 결과와 같이 계산된 자속전류는 실제의 자속전류보다 작아진다.



(a) 속도 및 자속각 추정편차



(b) 고정자 전류

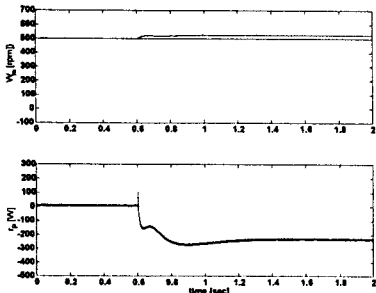
그림 2. 엔코더 고장의 영향

5.2 엔코더 고장의 검출

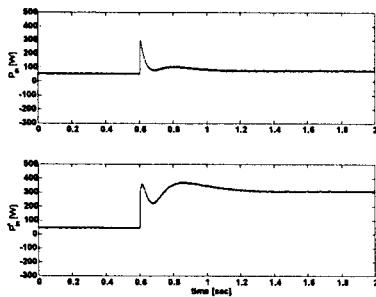
잔차 발생 알고리즘의 성능을 시험하기 위하여 다음과 같은 고장 시나리오를 고려하였다.

고장 시나리오 : 전동기가 500(rpm)으로 정속 운전되고 있는 상황에서 0.6(sec)에서 엔코더 홀의 일부가 차단되어 엔코더 이득이 5% 감소한 경우를 고려하였다. 즉 $\hat{\omega}_m = (1-0.05)\omega_m$ 이 된다.

엔코더 고장이 발생하면 그림(a)와 같이 실제 전동기 속도가 5% 증가하였으며, 잔차는 고장 발생 후 크게 증가하였다. 좀더 상세한 분석을 수행함으로써 엔코더 고장시 잔차에 가장 크게 기여하는 것은 기계적 출력이며 자계 저장전력은 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다.



(a) 속도 및 잔차



(b) 공급전력 및 계산된 공급전력

그림 3. 고장 시나리오에 대한 전력 및 잔차 제적

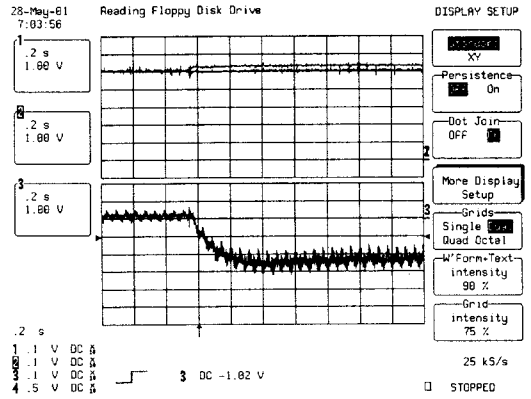
6. 실험결과 및 검토

제한된 알고리즘의 실제적인 적용 가능성을 검토하기 위하여 실험을 수행하였다. 제어보드는 TI의 고성능 DSP인 TMS320VC33을 주 프로세서로 사용하며 실험 파형은 D/A 컨버터를 통하여 출력한 것을 LeCroy 오실로스코프를 이용하여 관측하였다. 실험조건은 시뮬레이션과 같은 고장 시나리오를 가정했다. 그림(a)에서 속도는 100(rpm)/1[V]를 나타내고 그림(a)의 잔차와 그림(b)의 전력들은 100(W)/1[V]를 나타낸다. 실험결과와는 그림에서 보듯이 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다. 실험 결과는 제안된 고장검출 기법이 2% 이내의 엔코더 고장을 신속히 검출함을 보여준다.

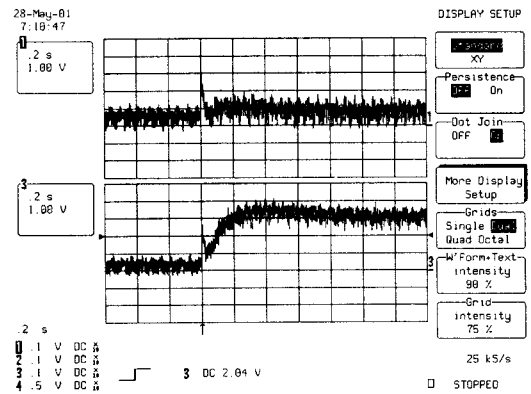
7. 결 론

간접 벡터제어되는 고성능 유도전동기 속도제어시스템에서 엔코더 고장이 각 변수 및 제어시스템의 성능에 미치는 영향을 수학적 모델을 이용한 해석적 방법 및 시뮬레이션에 의하여 분석하였다. 특히 엔코더 고장이 전력의 수급관계에 미치는 영향을 해석함으로써 전력

방정식에 근거한 패리티 방정식을 유도하였으며, 그 결과에 근거하여 엔코더의 고장을 발생 초기에 검출하기 위한 잔차 발생 알고리즘을 제안하고 실제적인 적용 가능성과 성능을 검토하기 위하여 실험을 수행하였다. 제안된 검출기법의 장점은 칼만필터, 상태관측자 등의 복잡한 추정알고리즘을 사용하지 않고 벡터제어입력 산출 과정에 도입되는 정보만에 의해 잔차 발생이 가능하며, 잔차 발생의 단순성으로 인하여 실시간 적용이 용이하다는 것이다.



(a) 속도 및 잔차(위로부터 ω_m , $\hat{\omega}_m$, r_P)



(b) 공급전력(P_m) 및 계산된 공급전력(\hat{P}_{in})

그림 4. 고장 시나리오에 대한 실험결과

본 논문은 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer Verlag, 1996.
- [2] C. Thybo, *Fault-tolerant Control of Inverter Fed Induction Motor Drives*, Ph.D. thesis, Aalborg University, Denmark, 2000.
- [3] S. M. Bennett, R. J. Patton, and S. Daley, "Using a bilinear motor model for a sensor fault tolerant rail traction drives," *SAFEPROCESS' 97*, pp. 783-788, 1997.
- [4] 류지수, 이기상, "속도센서 없는 유도전동기 구동장치를 위한 전류센서 고장검출기법," 한국자동제어 학술회의 논문집 C권, pp. 140-143, 1999.