

모델 기반 유도전동기 고장진단에 관한 연구

이홍희, 이현영

울산대학교 전기전자정보시스템공학부

A Study on the Model Based Diagnosis of Induction Motor

H.H. Lee and H.Y. Lee

School of Electrical Engineering and Information System, University of Ulsan, Korea

ABSTRACT

The predictive maintenance can help to avoid the serious plant breakdowns and catastrophies. This paper deals with the fault diagnosis of the rotor of the induction motor which is widely used in the plants. In order to detect the broken bar, the Extended Kalman Filter is adopted to estimate the rotor resistance on the base of model-based method. The proposed estimation method is simulated with the aid of Matlab.

1. 서 론

기존의 설비유지관리기술은 설비부품 또는 설비 시스템이 고장, 파손되면 수리하거나 교환하는 등의 사후보수(Breakdown Maintenance)개념이 일반적이었다. 그러나 설비의 규모가 대형화, 고비용화 및 고기능화되면서 고장사고의 예지보전개념이 요구되기 시작하였다.

유도전동기는 산업 플랜트에 가장 많이 적용되고 있고 가장 중요한 부분을 담당하고 있다. 따라서 고장이나 파손되기 이전에 고장 징후를 찾아내는 것은 전체 플랜트의 예지보전에 있어 중요한 부분이 된다.

일반적으로 유도전동기의 결함은 크게 분류하면 기계적인 결함과 전기적인 결함으로 나눌 수 있다.^[1] 기계적인 결함은 축의 불일치, 조임의 헐거움, 회전자 마찰, 베어링의 결함등과 같은 기계적 요인에 의한 결함을 의미하며 전기적인 결함은 회전자 절연결함, 회전자 이상등과 같은 전기적인 요인에 의한 고장을 의미한다.

또한 이러한 결함에 대한 다양한 고장진단 방법들이 소개되고 있다. 이러한 방법들은 플랜트의 수학적 모델을 사용하는가의 여부에 따라서 비모델기

반기법(non-model Based Method)과 모델기반 기법(model based method)으로 구분된다.^[3] 비모델기반기법에는 진동해석기법, 전류해석기법, 화학적 분석 등이 소개되고 있다.^[1-2]

일반적으로 회전자 봉에 결함이 있을 경우 저항값의 증가현상이 발생하는데 이러한 현상을 본 논문에서는 모델기반기법 중의 하나로서 확장 칼만 필터를 이용하여 추정된 유도전동기 파라미터를 분석하여 진단할 수 있음을 보인다.

2. 확장칼만필터를 이용한 회전자 고장진단

유도전동기의 모델은 일반적으로 4차 모델이 이 사용되지만 선형화 과정에서 계산이 복잡해지므로 다음과 같이 2차 모델을 사용한다.^[9]

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = C(\omega_m)X + D(\omega_m)U + EU \quad (2)$$

$$X = [\phi_{rd} \ \phi_{rs}]^T U = [I_{sd} \ I_{sd}]^T Y = [U_{sd} \ U_{sd}]^T$$

$$\text{단, } A = -\frac{R_r}{L_r} I, \quad B = R_r I, \quad C = -\frac{R_r}{L_r} I + \omega_m J$$

$$D = (R_s + R_r)I + L_{fs}\omega_m J, \quad E = L_{fs}I$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{and } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_m = p\Omega_m (\text{회전자 속도})$$

R_s : 고정자 저항, L_{fs} : 누설 인덕턴스, R_r : 회전자 저항, L_r : 회전자 인덕턴스

(1)식의 선형 상태방정식을 주기 T에 대해서 이산상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X_{k+1} = e^{AT}X_k + \int_0^T e^{A(T-\tau)}BU(t+\tau)d\tau \quad (3)$$

샘플링 주기동안 $U(t) = U_k$ 라면, 이산 상태방정식

은 아래와 같이 정리된다.

$$X_{k+1} = A_d X_k + B_d U_k \quad (4)$$

$$\text{단, } A_d = e^{-\frac{R_r}{L_r} T} I, \quad B_d = L_r (1 - e^{-\frac{R_r}{L_r} T}) I$$

파라미터 추정을 위해서 다음과 같은 파라미터 벡터를 상태벡터에 추가하여 확장된 상태벡터를 얻는다.

$$\theta_k = [R_s(t) \quad L_{fs}(t) \quad R_r(t) \quad N_r(t)]^T$$

$$X_{e,k} = [X_k \quad \theta_k]^T \quad \text{단, } N_r = \frac{1}{L_r}$$

이러한 상태추가에 따라서 시스템은 비선형 모델이 되므로 선형화 과정이 필요하다. 또한 확장 칼만 필터를 적용하기 위해 결정적 모델의 상태와 측정 외란은 백색 가우시안 노이즈이고, 파라미터가 일정하거나 아주 천천히 변한다고 가정하여($\dot{\theta}(t)=0$) 다음과 같은 확률적 확장 모델을 얻을 수 있다.

$$X_{e,k+1} = f(X_k, \theta_k) + W_{e,k} \quad (5)$$

$$Y_k = g(X_k, \theta_k) + V_k \quad (6)$$

$$\text{단, } f = \begin{bmatrix} A_d(\theta_k) X_k + B_d(\theta) U_k \\ \theta_k \end{bmatrix}$$

$$g(X_k, \theta_k) = C_k(\omega_m, \theta_k) X_k + D_{e,k}(\omega_m, \theta_k) U_k + E(\theta_k) U_k$$

$W_{e,k}$ 는 확장 상태 외란, V_k 는 측정 외란을 나타내고 이에 대한 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$Q_{e,k} = E\{W_{e,k} W_{e,k}^T\}, \quad R_k = E\{V_k V_k^T\}$$

확장 칼만 필터는 두가지 과정을 거치게 된다. 첫 번째는 (5)에 주어진 확장모델에 의해서 확장된 파라미터를 추정하게 되고,

$$X_{k+1|k} = f(X_{k|k}, \theta_{k|k}) \quad (7)$$

$$Y_{k+1|k} = g(X_{k+1|k}, \theta_{k+1|k}) \quad (8)$$

추정된 값은 출력 추정 에러 의해서 수정되어 진다.

$$X_{k+1|k+1} = X_{k+1|k} + K_{k+1}(Y_{k+1} - Y_{k+1|k}) \quad (9)$$

칼만 이득 K는 추정오차의 분산을 최소화시키는 값이 된다. 하지만 칼만 필터는 선형 모델에만 적용되므로 우선 확장 모델을 추정된 확장 상태에 대

해서 아래와 같이 선형화 시켜야한다.

$$X_{err,k+1|k} = F_k X_{err,k|k} + W_{e,k} \quad (10)$$

$$Y_{err,k+1|k} = G_{k+1} X_{err,k+1|k} + V_{k+1} \quad (11)$$

단, X_{err} : 추정 오차

$$F_k = \left[\frac{\partial f(X_k, \theta_k)}{\partial X_e} \right] = \begin{bmatrix} A_d(\theta_k) & J_X \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

$$G_{k+1} = \left[\frac{\partial g(X_{k+1}, \theta_{k+1})}{\partial X_e} \right] = [C_k \quad J_Y]$$

$$J_X = \left[\frac{\partial X_{k+1,i}}{\partial \theta_j} \right] \text{ and } J_Y = \left[\frac{\partial Y_{k+1,i}}{\partial \theta_j} \right]$$

$$i=1,2 \quad j=1,2,3,4$$

칼만 이득과 추정오차의 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$P_{e,k+1|k} = F_k P_{e,k|k} F_k^T + Q_{e,k} \quad (12)$$

$$P_{Y,k+1|k} = G_{k+1} P_{e,k+1|k} G_{k+1}^T + R_{k+1} \quad (13)$$

$$K_{k+1} = P_{e,k+1|k} G_{k+1}^T P_{Y,k+1|k}^{-1} \quad (14)$$

$$P_{e,k+1,k+1} = P_{e,k+1|k} - K_{k+1} P_{Y,k+1|k} K_{k+1}^T \quad (15)$$

이상에서 언급한 과정을 통해 회전자 파라미터 추정을 위한 블록도로 표시하면 그림 1과 같다.

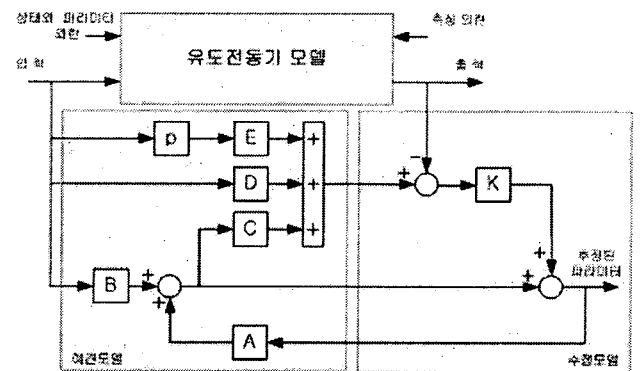


그림 1. 확장 칼만 필터 구조

이렇게 추정된 파라미터의 값은 정상상태 때의 값과 비교된다. 부러진 회전자 붕의 검출은 rotor가 부러지거나 이상 발생시 회전자 저항값이 증가하는 징후를 나타낸다. 따라서 추정된 회전자 저항값과 기준값의 차이에 의해서 회전자 이상을 찾아낼 수 있다.^[10] 실제로 이러한 과정에서 중요한 것은 회전자 결함으로 인한 저항 변화와 온도 변화 때문예 식 (16)과 같이 회전자 저항이 변화한 것을 구분하는 것이다.^[11]

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (16)$$

단, R_0 = 기준온도($T_0=25^\circ\text{C}$)에서의 저항값

α = 회전체의 온도계수

ΔT = 온도 증가량

온도에 의한 회전자 저항의 변화는 천천히 증가 후 일정한 값을 가지게 되고 결함에 의한 변화는 급격히 변하여 계단 함수 형태를 띄게 된다. 본 논문에서 수행한 확장 칼만 필터가 온도와 결함에 의한 회전자 저항값의 변화형태를 추정할 수 있음을 시뮬레이션을 통해서 보인다. 이것은 회전자 저항값의 변화가 온도에 의한 변화와 결함에 의한 것을 구분할 수 있게되어 유도전동기의 회전자 결함을 찾아 낼 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Matlab 프로그램으로 수행되었다. 그림 2-5에서는 2차의 유도전동기 모델을 이용한 확장 칼만 필터의 파라미터 추정값을 보여주고 있다.

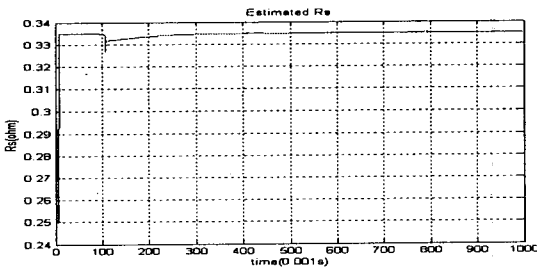


그림 2. 추정된 Rr (기준 : 0.335)

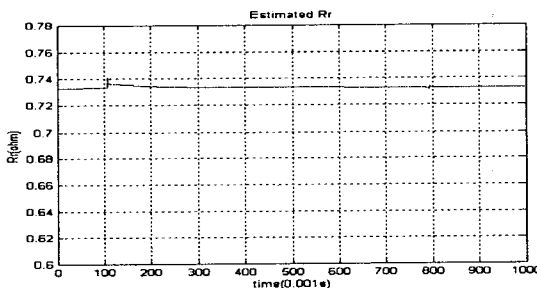


그림 3. 추정된 Rs (기준 : 0.733)

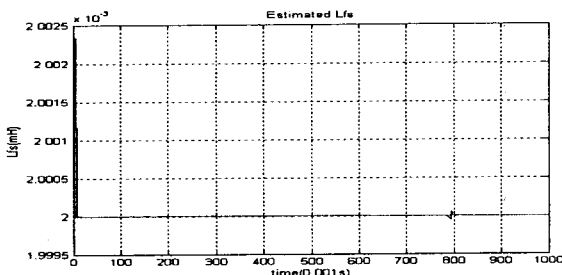


그림 4. 추정된 Lfs (기준 Lfs : 0.002)

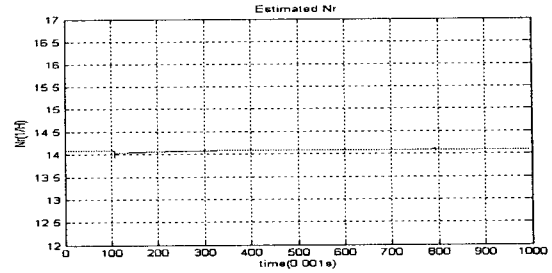


그림 5. 추정된 Nr (기준 : 1/0.071)

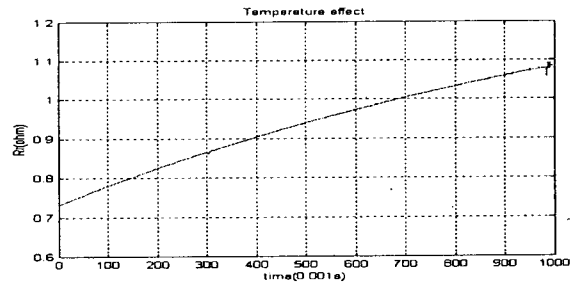


그림 6. 온도 변화에 따라 변하는 회전자 저항값의 추정

회전자의 온도는 유도전동기를 구동함에 따라서 점점 증가하다가 일정 온도에서 멈추게 된다. 그림 6에서는 이러한 형태의 회전자 저항 변화를 추정하는 결과 파형을 보여준다.

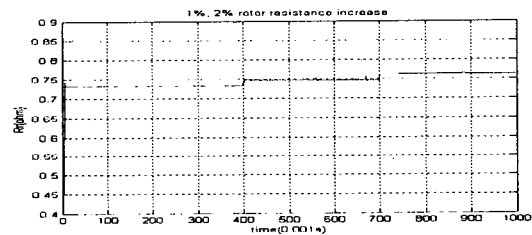


그림 7. 회전자 결함이 존재할때 추정된 Rr (1%, 2%)

하지만 회전자의 이상으로 인한 변화는 계단함수 형태를 띄게 된다. 그림 7은 이러한 계단 함수형태를 추정하는 결과파형을 보여준다.

3. 결 론

유도전동기의 고장진단은 복잡하고 계속 연구되고 있는 과제이다. 본 논문에서는 2차 유도전동기 모델을 사용한 확장 칼만 필터를 통해 파라미터를 추정하고 기준값과 비교하는 방법을 통해 유도전동기 회전자 결함을 찾아낼 수 있음을 보였다. 또한 추정된 회전자 인덕턴스, 고정자 저항 그리고 고정자 인덕턴스도 고정자 결함, 회전자 헐거움, 상의 불평형등의 유도전동기 결함 진단에 이용하고자 한다.

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [2] G.B Kliman and J. Stein, "Induction motor fault detection via passive current monitoring", International Conference in Electrical Machines, Cambridge, MA, 1990.
- [3] Janos J.Gertler, 'Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants.' IEEE, 1998.
- [4] Chow. E. Y and A. S. Willsky "Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems" IEEE Transactions on Automatic Control, 1984.
- [5] John T.Davis 'NEMA Induction Motor Vibration Measurement: A Comparison of Methods With Analysis' IEEE, 1993.
- [6] William R.Finley, 'An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems', IEEE, 1999.
- [7] Subhasis Nanj, H.Toliat, 'Fault diagnosis of electrical machines—a review' IEEE, 1999.
- [8] Kliman, Koegl, 'Noninvasive detection of broken bars in operating induction motor', IEEE EC, 1988.
- [9] ZEIN Ismail, 'An Extend Kalman Filter and an Appropriate Model for the Real-time Estimation of the Induction Motor Variables and Parameters'.
- [10] K.Rae Cho, J. H Lang 'Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation' IEEE Trans. Industry Applications, 1992.
- [11] R. Beguenane and M. E. H. Benbouzid, 'Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification', IEEE Trans. Energy Conversion pp. 481-482, 1988, April.
- [12] Shoen, RR, 'Motor bearing damage detection using stator current monitoring', IEEE 1994.
- [13] G.B. Kliman, W.J. Premerlani, 'A new approach to on-line fault detection in ac motor', IEEE-IAS, 1996
- [14] Ye Zhongming and W.U. Bin, 'A Review on Induction motor online fault diagnosis'.