

# MRAS를 이용한 유도전동기의 파라미터 온라인 추정에 관한 연구

윤인식, 변성훈, 김경서

LG산전연구소

## A Study on Parameter On-line Estimation of Induction Motor using MRAS

In-Sic Yoon, Sung-Hoon Byun, Kyung-Seo Kim

LG Industrial System R&D Center

### ABSTRACT

This paper presents a method for on-line estimation of rotor time constant of induction motor. The proposed method applies a model reference adaptive system(MRAS) using rotor flux vector. The MRAS consists of two independent observers to estimate the rotor flux vector; one based on voltage equations of rotor flux vector, the other based on current equations of them. The MRAS utilizes concept of auxiliary variables to normalize observer output and decrease high-frequency components of its input. Experimental results verify the validity and usefulness of proposed method

### 1. 서 론

오늘날 반도체 소자의 발달과 고성능 마이크로프로세서의 출현으로 벡터제어 알고리즘을 적용한 유도전동기는 고성능 속도 및 토크제어가 가능하게 되었다. 이러한 고성능 속도 및 토크제어는 완벽한 벡터제어가 구현될 때 가능하며 이를 위해 유도전동기 파라미터의 정확한 추정이 요구된다.<sup>[1]</sup>

유도전동기의 파라미터를 추정하는 방법으로는 크게 오프라인 추정기법과 온라인 추정기법으로 나눌 수 있다. 오프라인 추정기법은 무부하시험이나 구속시험처럼 고전적인 방법이나 정해진 시퀀스에 따라 유도전동기의 파라미터를 추정하는 방법이다.<sup>[2]</sup> 이러한 추정방법은 인버터 출력전압의 비선형성, 전류제어기 성능 등으로 인한 추정에러를 줄이는데 한계가 있으며 실제 운전시 파라미터들의 참값을 알 수 없는 문제점이 있다. 온라인 추정기법은 유도전동기가 운전하는 동안 제어성능에 영향을 미치는 파라미터들을 지속적으로 추정하는 것이다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 회전자 자속벡터를 이용한 MRAS

(Model Reference Adaptive System)를 적용하여 유도전동기 벡터제어에 있어 제어성능에 가장 많은 영향을 미치는 회전자 시정수를 온라인으로 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 기법의 유용성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 유도전동기의 모델링

유도전동기의 회전자 자속벡터를 고정좌표계로 나타내면 다음과 같다.<sup>[4]</sup>

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + p\sigma L_s & 0 \\ 0 & R_s + p\sigma L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega_r \\ \omega_r & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $L_s(=L_m+L_{ls})$ 는 고정자 자기인덕턴스,  $L_r(=L_m+L_{lr})$ 은 회전자 자기인덕턴스,  $L_m$ 은 상호인덕턴스이며  $R_s$ 는 고정자 저항,  $T_r=L_r/R_r$ 은 회전자 시정수이다. 그리고  $p=d/dt$ ,  $\omega_r$ 은 회전자 각속도이며  $\sigma=1-L_m^2/L_sL_r$ 는 전동기 누설계수이다. 식(1)은 회전자 자속벡터를 고정자 전압, 고정자 전류 및 전동기 파라미터로 나타낸 식이며 식(2)는 회전자 자속을 고정자 전류, 회전자 전기각속도 및 회전자 시정수로 나타낸 식이다.

#### 2.2 회전자시정수 추정알고리즘

그림 1은 회전자 시정수를 추정하기 위한 MRAS 구조를 보여주고 있다. 식(1)과 식(2)를 근거로 하여 회전자 자속벡터의 성분을 추정하기 위해 두 개의 상호 독립적인 관측기로 구성되어 있다.

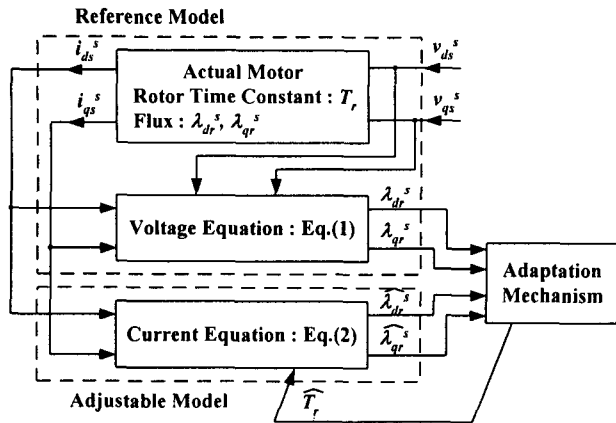


그림 1 회전자시정수 추정을 위한 MRAS 구조  
Fig. 1 Structure of MRAS for rotor time constant tuning

식 (1)에는 회전자 시정수( $T_r$ )이 포함되어 있지 않기 때문에 이 관측기를 유도전동기의 기준모델(Reference model)로 간주할 수 있으며 식 (2)는 회전자 시정수를 포함하고 있기 때문에 가변모델(Adjustable model)로 둘 수 있다.<sup>[5]</sup> 두 모델에서 구한 회전자 자속벡터를 이용하여 적절한 적응메커니즘(Adaptation mechanism)에 적용하여 가변모델의 회전자 시정수를 추정한다

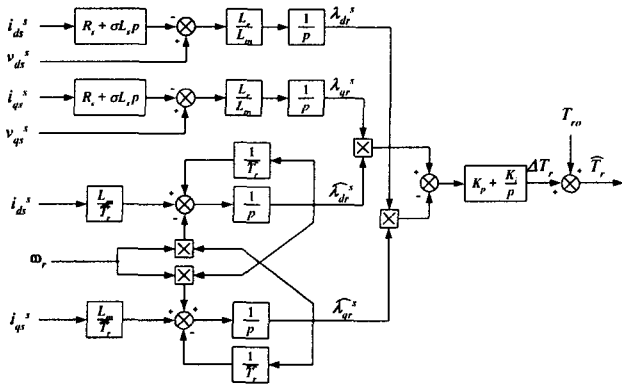


그림 2 회전자 시정수 추정을 위한 MRAS 블록도  
Fig. 2 Block diagram of MRAS for rotor time constant tuning

그림 2는 적응메커니즘에 기초한 회전자 시정수 추정 MRAS 블록도이다. 기준모델과 가변모델의 d, q축의 회전자 자속벡터를 구한 후, 기준모델과 가변모델의 회전자 자속벡터의 위상차이를 PI제어기의 입력으로 한다. PI제어기의 출력은 회전자 시정수의 미소변동  $\Delta T_r$ 이며 회전자 시정수의 초기값을 보상한다. 식(1)에 근거한 기준모델과 식 (2)에 근거한 가변모델의 회전자 자속벡터 관측기는 순수적분(Pure

integration)이 존재하기 때문에 이를 구현하는데 할 때 초기조건과 표류(Drift)의 문제가 발생할 수 있다. 그러나 MRAS 구조에서는 모델의 출력이 실제 전동기 자속벡터량이 필요하지 않으며 단지 이들과 관련된 임의변수(Auxiliary variable)으로 적응메커니즘에 적용할 수 있기 때문에 순수적분으로 인한 문제점은 저역 통과 필터(Low-pass filter)를 이용함으로써 해결할 있다. 이러한 방법은 모델의 출력을 표준화(Normalize)하고 전동기 단자전압에서의 고주파 성분을 줄일 수 있다.

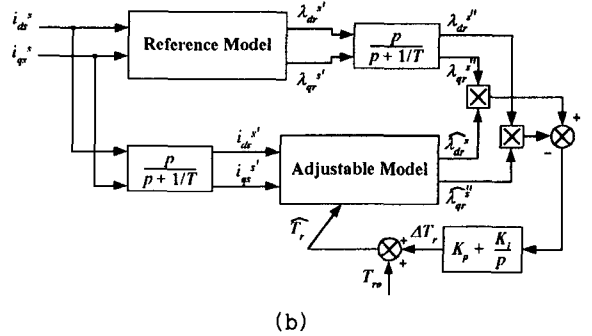
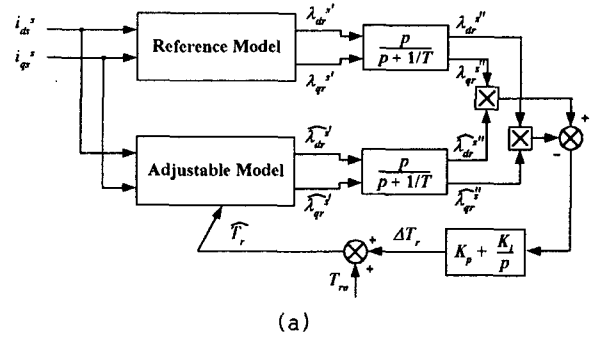


그림 3 임의변수를 이용한 MRAS 블록도  
Fig. 3 Block diagram of MRAS using auxiliary variables.

그림 3은 임의변수를 이용하여 그림 2의 MRAS를 수정한 방법을 보여준다. 각각의 경우 동일한 선형 전달 매트릭스를 기준모델과 가변모델에 삽입하였다. 기준모델의 경우 입력이 변하지 않기 때문에 기준모델의 출력에 선형 전달 매트릭스를 삽입하여야 한다. 그러나 가변 모델의 경우 그림 3에서 보는 바와 같이 입력 또는 출력 어느 곳에 두어도 된다. 그러나 그림 3(a)와 같이 기준모델과 가변모델이 동일한 구조일 경우 Hyperstability 조건을 충족하지 않기 때문에 그림 3(b)와 같이 선형 전달 매트릭스를 삽입한다.<sup>[6]</sup>

그림 4는 제안한 MARS의 블록도를 나타낸 것이다. 그림 3(b)와 같이 기준 모델에서는 출력단에 저역 통과 필터를 삽입하였으며 가변 모델에서는 입력단에 고역 통과 필터를 삽입하였다

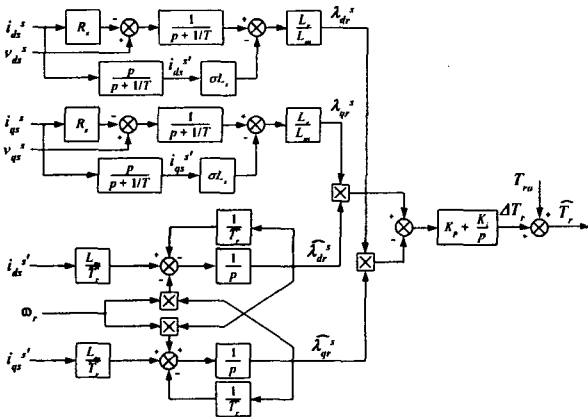


그림 4 제안한 MARS 블록도  
Fig. 4 Block diagram of the proposed MARS.

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 제안한 시스템의 블록도이며, 표 1에는 시뮬레이션과 실험에 사용된 유도전동기의 사양 및 각종 파라미터가 나타나 있다.

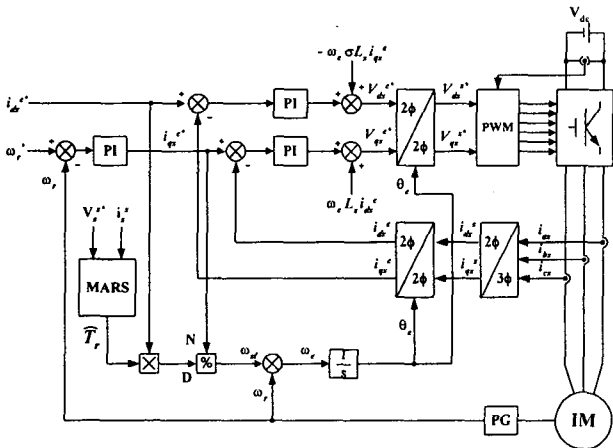


그림 5 제안된 시스템의 블록도  
Fig. 5 Block diagram of the proposed system.

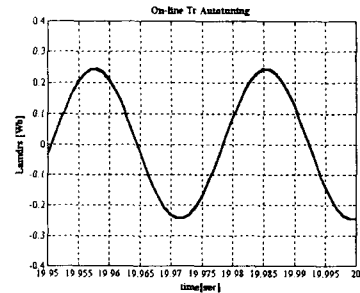
시뮬레이션에서는 직류링크전압을 300[V]로 설정하였으며 전류제어주기는 실험상황과 동일하게 100 [ $\mu$ s]로 설정하였다. 또한 속도제어주기는 1[ms]로 설정하였으며 제안된 알고리즘은 전류제어루프에서

표 1 유도전동기의 사양 및 파라미터

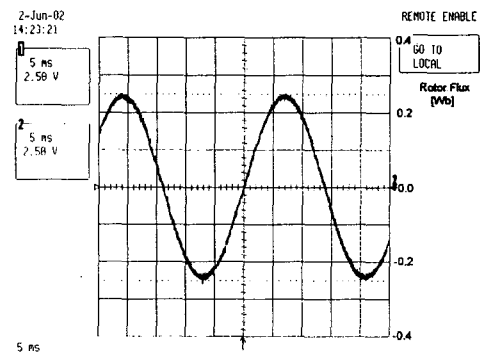
Table. 1 Specifications and parameters of induction motor

정격용량[kW]	3.7	$R_s$ [ $\Omega$ ]	0.571
정격전압[V]	220	$R_r$ [ $\Omega$ ]	0.349
정격전류[A]	12.9	$L_s$ [mH]	2.39
정격주파수[Hz]	60	$L_r$ [mH]	2.39
정격속도[rpm]	1,730	$L_m$ [mH]	54.61
극 수	4	$J_m$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]	0.1

실행하였다. 전동기 운전속도를 1,000[rpm]으로 설정하고 부하를 100[%] 인가하였을 때 회전자 자속의 시뮬레이션 파형과 실험파형은 그림 6과 같고, 회전자 시정수의 시뮬레이션 파형과 실험파형은 그림 7과 같다.

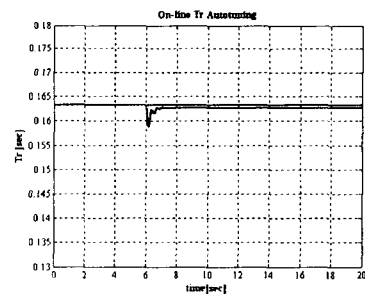


(a) Simulation Results.

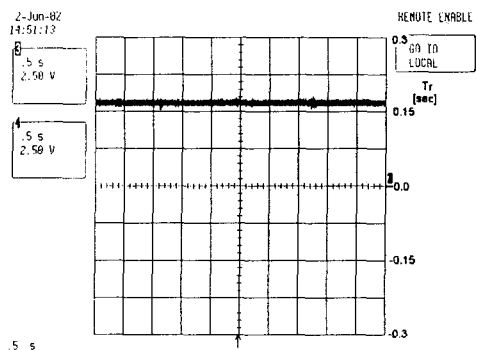


(b) Experimental Results.

그림 6 회전자 자속벡터 파형  
Fig. 6 Waveform of rotor flux vector



(a) Simulation Results.



(b) Experimental Results.

그림 7 회전자 시정수 파형  
Fig. 7 Waveform of rotor time constant

그림 6에서 알 수 있듯이 회전자 시정수가 초기 조건(표 1의 조건)일 때 시뮬레이션과 실험에서 기준모델의 회전자 자속벡터와 가변모델의 회전자 자속벡터의 위상이 일치함을 알 수 있다. 그림 7에서 보듯이 시뮬레이션과 실험에서 회전자 시정수는 초기값에 수렴함을 알 수 있다.

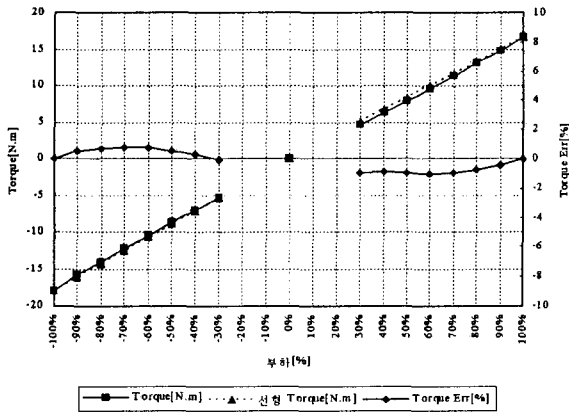


그림 8 출력 토크 및 토크선형성  
Fig. 8 Output torque and linearity of torque

그림 8은 유도전동기의 운전속도를 1,000[rpm]으로 유지시키면서 회전자 시정수의 초기값을 163 [ms]으로 설정하고, 제안된 추정기법을 적용하였을 때의 출력토크 및 토크선형성에 대한 오차를 나타낸 것이다. 부하에 따라 약간의 차이가 있지만 토크선형성에 있어 토크오차가 모두  $\pm 2\%$ 이내에 들어왔다.

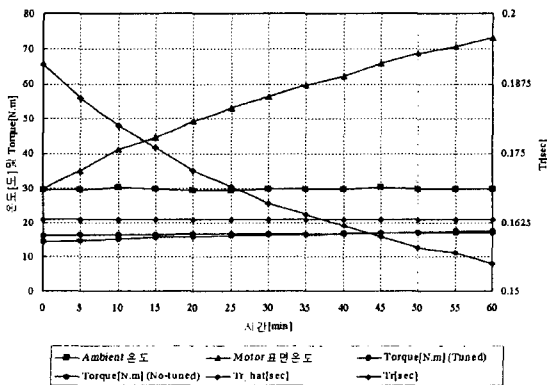


그림 9 유도전동기의 온도시험  
Fig. 9 Temperature test of Induction motor

그림 9는 일정속도(1,000[rpm])이고 일정토크지령(100[%])일 때 유도전동기의 표면온도가 상승함에 따라 회전자 시정수와 출력토크의 변화를 나타낸 것이다. 회전자 시정수를 초기값 163[ms]으로 설정

하였을 때 전동기의 표면온도가 상승함에 따라 출력토크가 증가하였다. 그러나 제안된 회전자 시정수 추정기법을 적용하였을 때는 전동기의 온도변화에 무관하게 출력토크가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 벡터제어용 유도전동기의 회전자 시정수를 온라인으로 추정하는 새로운 기법을 제시하였다. 제안된 회전자 시정수 추정기법은 회전자 자속벡터를 이용한 MRAS를 적용하였다. MRAS는 회전자 자속벡터를 추정하는 독립적인 두 개의 관측기로 구성되어 있다. 기준모델로 사용되는 관측기는 회전자 자속벡터의 전압방정식을 이용하였으며 가변모델의 관측기는 회전자 자속벡터의 전류방정식을 이용하였다. MRAS에서 사용되는 유도전동기의 회전자 자속벡터의 성분은 전동기의 실제 자속벡터량이 아니라 이에 관련된 임의의변수를 사용함으로써 순수적분기의 단점을 보완하였다. 실험을 통해 제안된 회전자 시정수 추정기법이 유도전동기 출력토크의 선형성이  $\pm 2\%$ 미만의 오차를 가짐을 알 수 있었으며 유도전동기의 온도변화에 무관하게 출력토크가 일정함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Peter Vas, "Parameter estimation, Condition monitoring, and Design of electrical machine," Clarendon Press Oxford, pp. 279-306, 1993.
- [1] Peter Vas, "Parameter estimation, Condition monitoring, and Design of electrical machine," Clarendon Press Oxford, pp. 279-306, 1993.
- [3] 권병기, 최창호, 현동석, "연속공정라인에서 벡터제어용 유도전동기의 오프라인 파라미터 추정", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제1호, pp. 88-94. 2000.
- [3] Ha-Yong Kim, Myoung-Ho Shin, Dong-Seok Hyun, "On-Line Tuning of Parameter Variations of Induction Motor for High Performance Drives," IEEE IAS '98, pp. 431-437, 1998.
- [4] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives," Prentice-Hall, pp. 28-51.
- [5] Timothy M. Rowan, Russel J. Kerkman, David Leggate, "A Simple On-Line Adaption for Indirect Field Orientation of an Induction Machine," IEEE Trans. IA. vol. 27, No. 4, pp. 720-727, Jul./Aug.,1991.
- [6] Colin Schauder "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers," IEEE Trans. IA. vol. 28., no. 5, pp. 1054-1061, Sept./Oct., 1992.