

적응 제어 기법을 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 벡터 제어

\* 김배선\*, 한우용\*\*, 이 창구\*, 김성중\*  
 전북대학교 전자정보공학부\*, 전주공업대학\*\*

Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor  
 Using Adaptive Control Method

\* Bae-sun Kim\*, Woo-Yong Han\*\*, Chang-goo Lee\*, Sung-jung Kim\*  
 Chonbuk National Univ.\*, CheonJu Technical College\*\*

**Abstract** - This paper deals with the speed sensorless vector control of Induction motor using speed observer based on adaptive method. This system is modeled by using the system level simulator, Matlab/Simulink. The model consists of SVPWM Inverter Model, Induction Motor Model and speed observer based on adaptive method. The results show the effectiveness of Matlab/Simulink in simulation of the Induction Motor.

1. 서 론

속도와 토크의 가변이 요구되는 산업용 및 운송 분야에서 feedback제어를 실현하기 위해서는 엔코더, 레졸버 등을 이용하여 속도나 위치를 측정하는 것이 일반적이다. 벡터제어에 의해 유도전동기를 구동하는 경우에도 속도나 위치 정보를 얻기 위해서 속도 센서를 사용할 수 있다. 그러나 속도 센서를 사용할 경우 설치비용의 부담과 열악한 환경 속에서는 속도 센서의 신뢰성이 감소하므로 속도 센서를 사용하지 않는 속도 제어 방식을 이용하는 추세이다.

자속 추정기를 가지는 직접 벡터 제어 방법은 속도 센서는 없으나 순수 적분기를 사용해야하는 단점이 있다. 또한 저속 영역에서는 자속 추정기가 잘 동작하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 적응 제어 이론에 기반을 둔 적응 속도 추정기(4)를 사용하여 유도전동기의 속도를 추정하였다. 이 방법은 순수 적분을 사용하지 않으며 시스템의 안정도에 대해서도 설명할 수 있다. 그리고 Matlab /Simulink를 이용하여 적응 속도 추정기, 공간벡터 PWM(5), 유도전동기 모델(2) 등을 구현하고 적응 속도 추정기가 좋은 성능을 가짐을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

2. 본 론

2.1 적응 속도 추정기

2.1.1 자속 관측기 모델

정지 좌표계에서 유도전동기의 고정자 방정식은 식(1) 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bv_s \tag{1}$$

$$y = Cx \tag{2}$$

$$x = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]^T \quad y = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$$

$$v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T \quad A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$B = [B_1 \ 0]^T \quad C = [I \ 0]$$

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

$$A_{11} = \left[ \frac{-R_r}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right] I \quad A_{12} = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \left[ \frac{1}{T_r} I - w_r J \right]$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{T_r} I \quad A_{22} = -\frac{1}{T_r} I + w_r J \quad B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} I$$

고정자의 전류와 회전자 자속을 함께 추정하는 상태 관측기의 방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{A}\hat{x} + Bv_s + G(\hat{i}_s - i_s) \tag{3}$$

G는 관측기의 gain matrix로 식(3)을 안정하도록 정한다.

2.1.2 속도 추정기 메카니즘

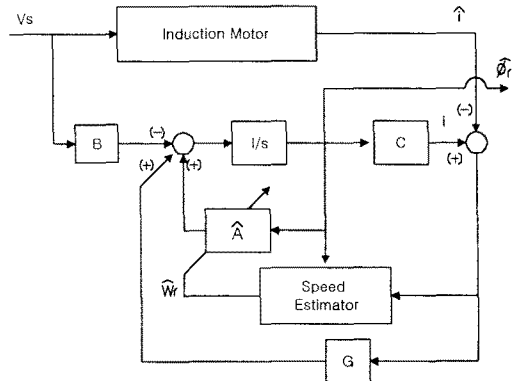


그림 1 회전자 속도 추정을 위한 블록 다이어그램

속도 센서가 없을 때 식(3)과 같이 상태 관측기 방정식은 미지의 파라미터를 포함하게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이  $\hat{A}$  matrix의  $\hat{w}_r$  값을 추정하는 방법이 요구된다. 이 추정 방법을 유도하기 위해 Lyapunov's theorem이 이용된다. 식(1)과 식(2)로부터 상태 추정 에러 방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{d}{dt} e = (A + GC)e - \Delta A \hat{x} \tag{4}$$

$$e = x - \hat{x} \quad \Delta A = \hat{A} - A$$

$$k = (\sigma L_s L_r) / L_m \quad \Delta w_r = \hat{w}_r - w_r$$

Lyapunov function으로 정의하면 식(5)와 같고

$$V = e^T e + (\hat{w}_r - w_r)^2 / \lambda \tag{5}$$

여기서  $\lambda$ 는 양의 상수이다.

식(5)를 미분하면

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V &= e^T((A+GC)^T + (A+GC))e \\ &\quad - 2\Delta w_r \{e_{ids} \widehat{\phi}_{qr} / k - e_{iqs} \widehat{\phi}_{dr} / k\} \\ &\quad + 2\Delta w_r \frac{d}{dt} \widehat{w}_r / \lambda \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $e_{ids} = i_{ds} - \widehat{i}_{ds}$ ,  $e_{iqs} = i_{qs} - \widehat{i}_{qs}$   
 식(6)에서 두 번째 항과 세 번째 항이 같아지도록 하  
 면 속도 추정을 위한 적응 기법을 식(7)과 같이 얻을  
 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{w}_r = \lambda (e_{ids} \widehat{\phi}_{qr} - e_{iqs} \widehat{\phi}_{dr}) / c \quad (7)$$

만약 식(6)의 첫 번째 항의 관측기의 gain matrix  $G$   
 가 negative-semidefinite하게 결정한다면 그림1의 적  
 용 속도 추정기는 안정하다.

유도 전동기의 속도는 빠르게 변화하므로 속도 추정 응  
 답을 향상시키기 위해 식(8)과 같은 적응 기법을 사용  
 한다.

$$\widehat{w}_r = K_p (e_{ids} \widehat{\phi}_{qr} - e_{iqs} \widehat{\phi}_{dr}) + K_I \int (e_{ids} \widehat{\phi}_{qr} - e_{iqs} \widehat{\phi}_{dr}) dt \quad (8)$$

$K_p, K_I$  는 임의의 양의 정수이다.

## 2.2 적응 속도 추정기와 유도전동기의 모델

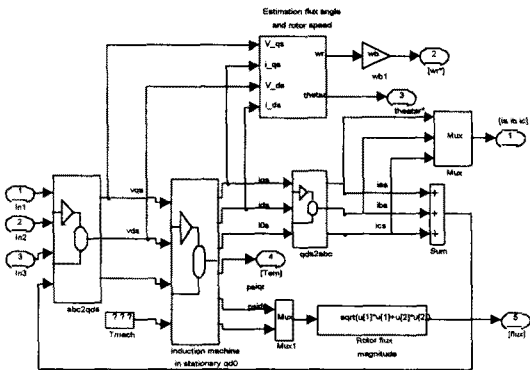


그림 2 적응속도추정기를 가지는 유도전동기 모델

유도 전동기의 Matlab/Simulink 모델은 3상-2상  
 변환부, 고정 좌표계에서의 고정자, 회전자 전압 방정식  
 으로 구현된 전동기 모델부, 2상-3상 변환부, 적응 속  
 도 추정기 등으로 크게 구성된다.

## 2.3 공간 벡터 PWM 및 인버터 모델

공간 벡터 PWM 모델은 dq축 전압으로 기준 벡터가  
 위치하는 섹터와 인접 벡터의 인가 시간을 계산하는 부  
 분과 시간의 흐름에 따라 각 상의 온과 오프 시점을 결  
 정하는 부분, 그리고 PWM 패턴을 생성하는 부분으로  
 구성된다. 인버터는 IGBT를 이상적인 스위칭으로 생  
 각하여 스위칭 함수로 구성하였다.

공간 벡터 섹터 계산은 아래 알고리즘으로 하였고

$V_{qs} > 0$  일때 섹터 "m = 1, 2 or 3"

$|V_{ds}| > \sqrt{3} |V_{qs}|$  일 때 섹터 "m = 1 or 3"

아니면 섹터 "m = 2"

위 조건에 대해  $|V_{ds}| > 0$  일 때 섹터 "m = 1"

아니면 섹터 "m = 3"

$V_{qs} < 0$  일때 섹터 "m = 4, 5 or 6"

$|V_{ds}| > \sqrt{3} |V_{qs}|$  일 때 섹터 "m = 4 or 6"  
 아니면 섹터 "m = 5"  
 위 조건에 대해  $|V_{ds}| > 0$  일 때 섹터 "m = 6"  
 아니면 섹터 "m = 4"

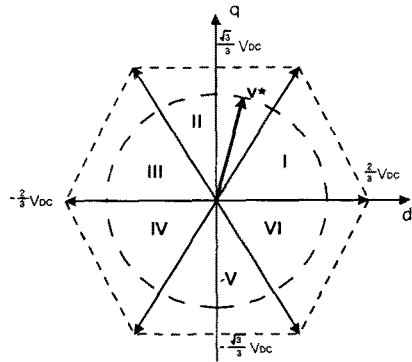


그림 3 공간 벡터의 섹터 구분

인접 벡터의 유효 시간 계산은 식(9)로 하였다.

$$T_m = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ V_{ds} \sin\left(\frac{m\pi}{3}\right) - V_{qs} \cos\left(\frac{m\pi}{3}\right) \right]$$

$$T_{m+1} = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ -V_{ds} \sin\left(-\frac{(m-1)\pi}{3}\right) + V_{qs} \cos\left(-\frac{(m-1)\pi}{3}\right) \right] \quad (9)$$

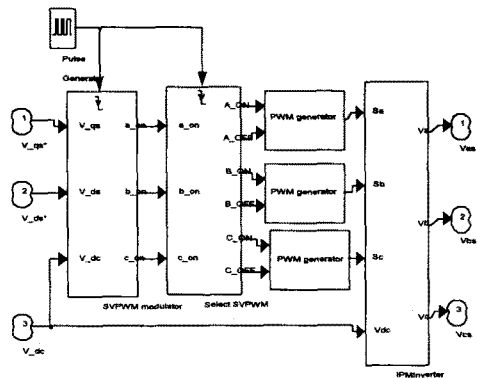


그림 4 SVM PWM 발생기와 전압형 인버터 모델

## 2.4 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 이용된 유도 전동기의 파라미터는 표 1  
 과 같다.

표 1 유도전동기 파라미터

20[HP], 220[V], 60[Hz], 4[P]	
고정자 저항	0.1062 [ $\Omega$ ]
회전자 저항	0.0764 [ $\Omega$ ]
상호 인덕턴스	15.47 [mH]
고정자 누설 인덕턴스	0.57 [mH]
회전자 누설 인덕턴스	0.57 [mH]
회전자 관성 모멘트	2.5 [ $\text{kgm}^2$ ]

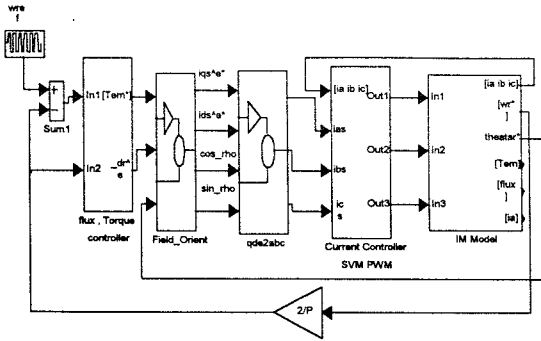


그림 5 전체 시스템 구성도

시뮬레이션의 전체 시스템 구성은 그림 5와 같고 parameter는 variable-step 방식의 ode15s solver option을 사용하였다.

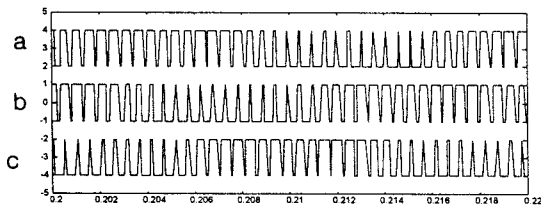


그림 6 인버터의 게이팅 신호

그림 6은 유효 벡터의 인가 시간에 의해 인버터를 스위칭하기 위한 게이트 신호를 보여주고 있다. 인버터의 스위칭 주파수는 2(KHz)로 하였다.

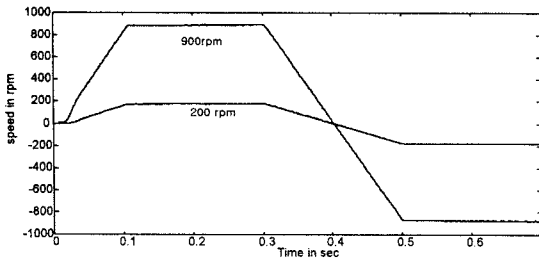


그림 7 적응 속도 추정기의 추정 속도

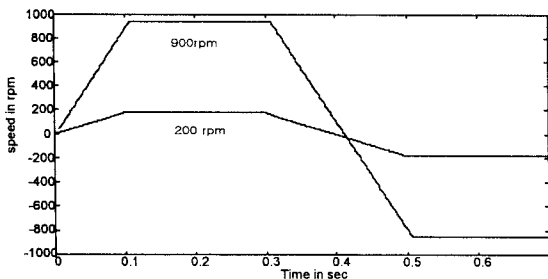


그림 8 기준 속도

그림 7과 그림 8에서 속도 추정기가 기준 속도를 잘 추정하고 있음을 보여주고 있다.

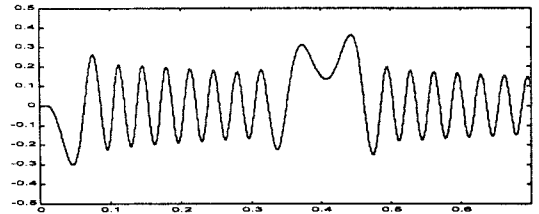


그림 9 900[rpm]에서 유도 전동기 q축 자속 파형

그림 9에서는 0.4 [sec]에서 그림 8에서 속도가 역전될 때 자속의 위상이 바뀌고 있음을 보여주고 있다.

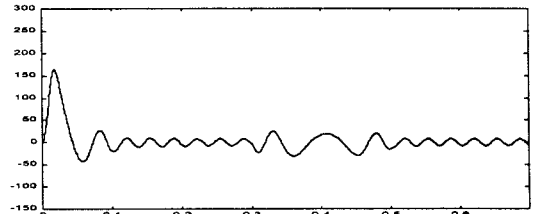


그림 10 900[rpm]에서 유도 전동기 전류 파형

그림 10에서 초기 기동 전류가 정격 이상 공급되고 있음을 나타내며 0.4 [sec]에서 속도 역전시 전류 변화를 보여주고 있다. 정격 전류는 50[A]이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 적응 제어 기법을 기반으로한 속도 추정기를 이용하여 유도전동기의 속도 센서리스 벡터 제어를 수행하였다. 회전자 속도를 자속 관측기를 이용하는 적응 속도 추정기로 추정하였다. 전체 시스템을 회로 시뮬레이터의 하나인 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링하였다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 적응 제어 이론을 기반으로 한 적응 속도 추정기의 성능을 확인하였다. 향후 시뮬레이션을 통해 확인 한 결과를 실험으로 구현하고 실제 실험과 시뮬레이션 모델이 유사하도록 수정·보완이 필요하다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 김준형, "회전자 자속 관측기를 사용한 유도전동기의 속도 센서리스 벡터제어", 전기학회지, 46권 7호, p1026-1033, 1997
- [2] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", PrenticeHallPTR, p196-229,p433-462 1998
- [3] C.M.Lee, "Observer-based speed estimation method for sensorless vector control of induction motors", IEE Proc-Control theory Appl, Vol. 145 No. 3, p359-363, 1998
- [4] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE, trans, vol 29 No. 2, p344-348, 1993
- [5] 김준석, "공간 전압 벡터 PWM의 새로운 기법", 전기학회지, 44권 7호, p865-874, 1995