

정속도 운전을 위한 유도 전동기 센서리스 벡터제어 시스템 모델링

황 재 호*^o · 이 학 주** · 안 재 황*** · 성 세 진*

*충남대학교 전기공학과, ** 전력 연구원, *** 동호공고

Sensorless Field Oriented control Modeling for Constant Speed Induction motor

Jae-Ho Hwang* , Hak-Ju Lee** , Jae-Hwang An*** , Se-Jin Seong*

* Dept.of Electrical Engineering of Chungnam National Univ.

Korea Electric Power Research Institute, * Dong-Ho Tech. High School

Abstracts

This paper be described the constant speed control of induction motor for high performance. Vector control system which is used the stator current, voltage of IM is modeled without the speed, flux sensor. The proposed control system be simulated using Matlab with Simulink. Results include the fast response of the constant speed and torque in proposed system. For high performance, this paper presents the robust characteristics of field oriented control system for IM.

1. 서 론

유도전동기는 구조가 간단하며, 유지보수면에서 유리하여 전동력 응용분야에서 그 범위가 확대되고 있으나, 고정자와 회전자 사이에 자기결합이 있고, 회전자의 위치변동에 따라 결합계수가 변화하는 비선형 시스템이다. 따라서 벡터제어에 의해 직류전동기와 유사한 제어특성을 가지는 고성능, 정밀제어의 수행이 가능하다. 벡터제어는 토오크의 선형성을 위하여 고정자전류를 자속과 토오크성분으로 분리, 상호간에 독립적으로 제어한다. 여기서 무엇보다도 자속에 관한 정보가 중요하고, 자속정보를 얻는 방식에 따라 직접, 간접 벡터제어로 분류한다.

본 논문에서는 유도전동기 직접 벡터제어 시스템을 자속, 속도센서를 사용하지 않고 고정자전류를 이용한 계산식에 의해 자속정보를 구하는 센서리스방식의 제어시스템을 Matlab/Simulink 환경에서 설계하고,

시뮬레이션을 통하여 제어특성을 고찰하였다. 결과에 서는, 제안한 직접벡터제어방식의 토오크 및 속도 응답을 포함하고 있으며, 간접벡터제어방식과의 비교로 시스템의 강인성을 보이고 있다.

2. 자속 벡터 제어

자속벡터제어는 동기 기준좌표계를 놓고 볼 때 고정자 전류벡터 i_s^e 와 회전자 자속벡터 λ_r^e 가 일정한 위상각을 유지하면서 각각 구별화 되는 것을 이용하여 유도전동기의 토크를 제어하는 방법이다. 그림 1은 이들 벡터의 관계를 설명하고 있는데, 즉 고정자 전류벡터 i_s^e 의 d축 성분인 i_{ds}^e 를 회전자 자속벡터 λ_r^e 의 q축에 일치하여 발생하는 유도전동기의 슬립을 조절함으로써 이러한 관계가 나타나게된다. 이때 회전자 자속벡터 λ_r^e 의 q축성분인 λ_{qr}^e 는 0이 되어 다음과 같이 식이 주어진다.

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{ds}^e + L_r i_{qs}^e = 0 \tag{1}$$

$$i_{qr}^e = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e \tag{2}$$

여기서, i_{qds}^e : 고정자 전류벡터 qd축 성분
(동기 기준좌표계)

λ_{qdr}^e : 회전자 자속벡터 qd축 성분
(동기 기준좌표계)

L_m : 자화 인덕턴스

L_r : 회전자 자기 인덕턴스

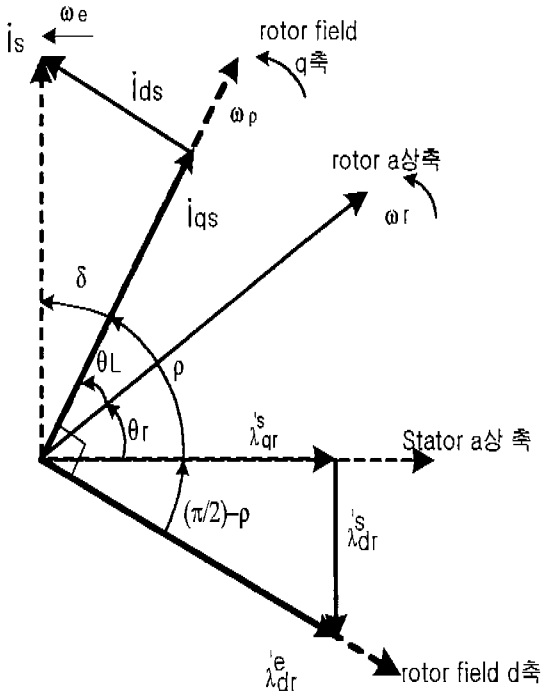


그림 1. 동기 좌표계를 이용한 dq 축 벡터도
토크에 관한 식에 대해서 살펴보면 λ'_{qr} 를 0으로 놓으면 다음과 같이 식이 주어지며

$$T_{em} = K_a \lambda'_{dr} i_{qr}^e \quad (3)$$

또한 식 (2)을 사용하면 회전자 자속과 고정자 전류의 곱으로서 간단하게 나타낼 수 있다.

$$T_{em} = K_a \frac{L_m}{L_r} \lambda'_{dr} i_{qs}^e \quad (4)$$

따라서 토크는 회전자 자속 λ'_{dr} 가 변하지 않는다고 가정하면 고정자 전류 i_{qs}^e 에 대해서 독립적으로 제어된다.

한편 속도에 관하여 생각해보면 회전자축의 전압방정식을 이용하는데 다음과 같다.

$$v_{qr}^e = r_r i_{qr}^e + p \lambda_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \quad (5)$$

$$v_{dr}^e = r_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e \quad (6)$$

여기서 회전자축 전압이 점점 감소하여 0이 되면서 λ'_{qr} 은 0이 되어 만약 변하지 않고, $\lambda'_{dr} = L_m i_{ds}^e$ 이 되면 다음과 같이 식이 유도되는데

$$(\omega_e - \omega_r) = \frac{r_r i_{qs}^e}{L_r i_{ds}^e} \quad (7)$$

결국 슬립은 고정자축 전류의 q축 성분과 d축 성분의 비가 된다.

그러나 직접적으로 이러한 전류에 접근하기 어려우므로 외부전압을 계산하여 기준전류인 (i_{qs}^{e*} 와 i_{ds}^{e*}) 또는 기준 전압인 (v_{qs}^{e*} 와 v_{ds}^{e*})에 가깝게 접근할 수 있는 방법이 필요한데 본 논문에서는 기준전압을 이용하기 위해 토크 제어기와 자속제어기를 사용한다.

3. 직접 자속 벡터 전압 제어

고정자축에 알맞은 전압원을 공급함으로써 고정자 전류의 자속벡터제어를 할 수 있게 되는데, 이러한 방법을 직접 자속벡터 전압제어라 한다. 전압제어를 사용하는 가장 직접적인 원인은 부하 토크가 변화했을 때 가능한 한 많은 회전자 자속이 동요되는 것을 방지하기 위함이다. 그러면 고정자 전압을 결정하기 위해서는 알맞은 고정자축 qd 고정자 전류가 결정되어야 하며 또한 그림 1에서 보듯이 고정자축의 회전자 자속을 알게 되면 회전자축과 고정자축 사이의 위상각인 ρ 의 값을 알 수 있으며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \cos \rho = \frac{\lambda_{dr}^s}{|\lambda_r^s|} \quad (8)$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \sin \rho = \frac{\lambda_{qr}^s}{|\lambda_r^s|}$$

따라서 동기기준좌표계의 qd축 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (9)$$

동기 기준좌표 고정자 전류 i_{qs}^e 를 사용하여 식 (7)를 사용하면 회전자축의 속도를 구할 수 있게 된다.

따라서 이것을 이용하므로 센서를 사용하지 않아도 제어를 할 수 있게 된다.

직접 자속벡터 제어에 의해 계산된 자속과 토크를 이용하여 고정자 a,b,c 상전압 명령치 보내어 알맞은 전압을 유도전동기에 공급한다. 이때 상전압 명령치를 구하기 위해 사용되는 동기 기준 좌표 고정자 전압 v_{ds}^e 는 다음과 유도할 수 있다.

$$(r_s + pL_s') i_{qs}^e + E_{qs}^e = v_{qs}^e - \omega_e L_s' i_{ds}^e \quad (10)$$

$$(r_s + pL_s') i_{ds}^e + E_{ds}^e = v_{ds}^e - \omega_e L_s' i_{qs}^e$$

여기서, $L_s' = (L_s - \frac{L_m^2}{L_r})$ 이다.

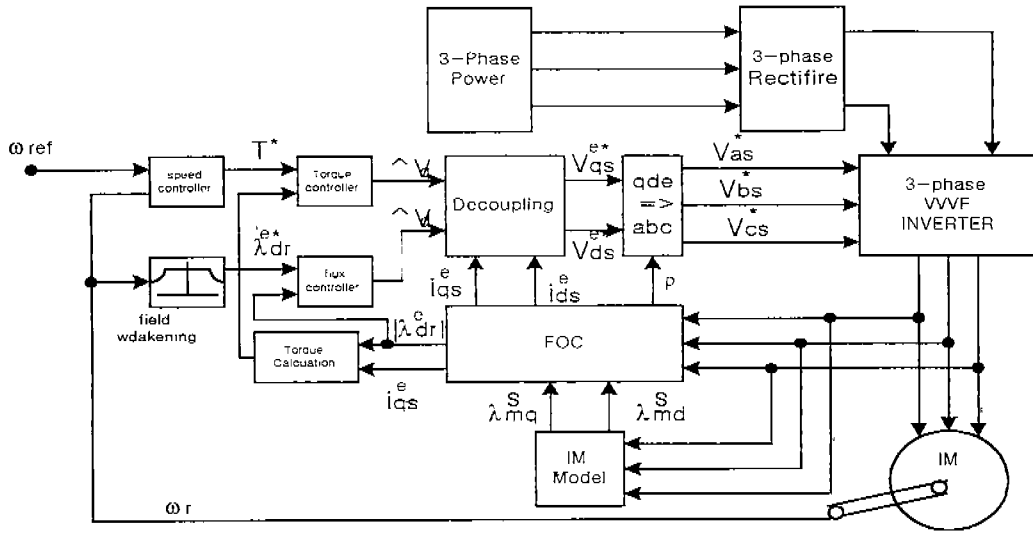


그림 2. 직접 자속벡터 제어를 이용한 유도전동기 모델 구성도

명령치 고정자 기준좌표 고정자 전압 v_{qds}^{s*} 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^{s*} \\ v_{ds}^{s*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \end{bmatrix} \quad (11)$$

결과적으로 명령치 a,b,c상전압은 qd축 전압을 a,b,c 축으로 변환하여 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{bmatrix} v_{as}^{s*} \\ v_{bs}^{s*} \\ v_{cs}^{s*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^{s*} \\ v_{ds}^{s*} \end{bmatrix} \quad (12)$$

4. 유도전동기 모델

본 논문에서는 유도전동기의 모델을 고정자 기준 좌표에 의한 방식을 사용하였다. 먼저 고정자와 회전자 전압방정식에 대해 알아보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{qdos}^s &= \frac{P}{\omega_b} \Psi_{qdos}^s + r_s i_{qdos}^s \\ v_{qdr}^s &= \frac{P}{\omega_b} \Psi_{qdr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{qdr}^s + r_r i_{qdr}^s \\ v_{or}^s &= \frac{P}{\omega_b} \Psi_{or}^s + r_r i_{or}^s \end{aligned} \quad (13)$$

다음 식은 자속 방정식을 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{qs}^s \\ \Psi_{ds}^s \\ \Psi_{os}^s \\ \Psi_{qr}^s \\ \Psi_{dr}^s \\ \Psi_{or}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_k + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{os}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{or}^s \end{bmatrix} \quad (14)$$

마지막으로 토크방정식을 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{qr}^s i_{dr}^s - \Psi_{dr}^s i_{qr}^s) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i_{dr}^s i_{qs}^s - i_{qr}^s i_{ds}^s) \end{aligned} \quad (15)$$

5. 속도 제어 및 시스템 구성

토크와 자속제어 루프에 독립적인 속도제어구조는 그림 3에서 보여주고 있다. 제어구조는 속도의 경우 정상상태에서는 오차가 0으로하기위해 PI제어기를 사용하며 토크의 경우에도는 역시 PI제어기를 사용하여 보상을 해준다. 자속 명령치와 피드백 된 자속을 서로 비교하여 PWM인버터에 전압명령를 내려주게 된다.

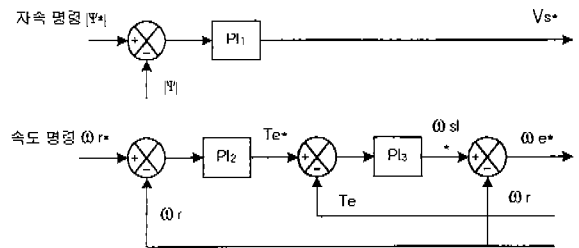


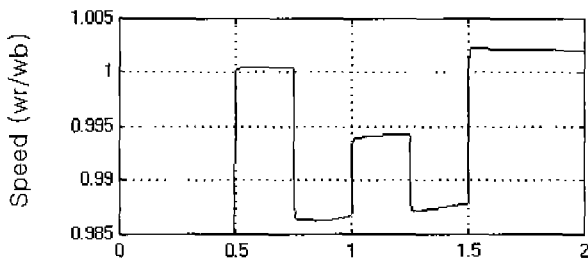
그림 3. 토크와 자속제어를 포함한 속도제어 전체적인 시스템의 구성은 그림 2와 같이 간략하게 직접 자속벡터제어를 위한 FOC(Field-Oriented Controller)블럭과 속도 및 자속추정을 위한 제어기 블럭 그리고 3상 인버터블럭으로 구성하였다. 그림 2의 모델은 Matlab with Simulink 환경하에서 각각의 블럭을 모델화 하고 이를 시뮬레이션 하였다.

6. 시뮬레이션 결과

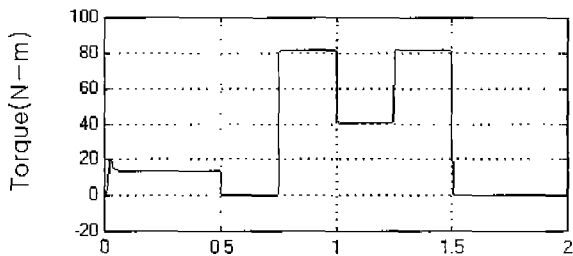
시뮬레이션에서 사용된 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같으며, 정속도 운전특성을 살펴보기 위해 외부의 부하토크를 가 하였다. 그림 4와 5는 직접벡터제어 방식으로 운전하여 얻은 토크 및 속도특성의 강인성을 입증하기 위해 기존에 구성되어있는 간접벡터제어 방식의 토크 및 속도를 비교하였다. 토크 역시 간접벡터제어 방식에 비해 직접벡터제어방식이 더욱 빠른 응답성을 보여주고 있다.

시뮬레이션에 사용한 3상 유도전동기 파라미터 및 사양			
고정자 저항(r_s)	0.1062 Ω	종류	농형
회전자 저항(r_r)	0.0764 Ω	마력	20-hp
고정자 리액턴스(x_b)	0.2145 Ω	전압	220-V
회전자 누설 리액턴스(x_{lr})	0.2145 Ω	주파수	60(Hz)
자화 누설 리액턴스(x_m)	5.834 Ω	극수(P)	4(pole)
J(관성계수)	2.8(Kg/m^2)		

표 1 시뮬레이션에 사용된 유도전동기 파라미터

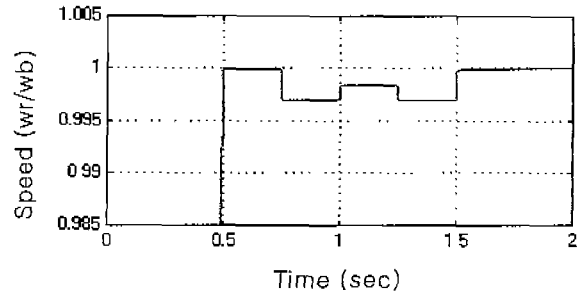


(a) 속도 응답

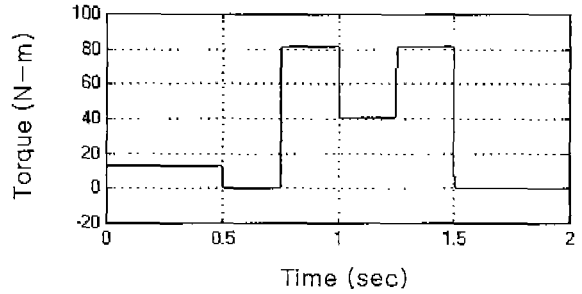


(b) 토크 응답

그림 4. 간접 벡터제어의 결과



(a) 속도 응답



(b) 토크 응답

그림 5. 직접 벡터제어의 결과

7. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 통하여, 직접벡터제어를 이용하여 유도전동기를 제어하는 경우, 센서를 사용하지 않고도 충분히 계산식을 사용하여 자속을 추정하고 이를 이용하여 속도 및 토크를 제어하는데 있어 간접벡터제어에 비해 일정한 속도 및 토크응답이 빠른 것 볼 수 있었다. 따라서 정속도 운전에서 센서리스한 직접벡터제어가 강인하다는 것을 입증하였다.

[참고 문헌]

- [1] CHEE-MUN ONG, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", 1998
- [2] Rajan Mathew, Dan Houghton, Wardina Oghanna "Vector control Techniques for induction Motors", PEDS95, Vol 2, PP. 813-818 1995.2
- [3] B.K.Bose, "Power Electronics and AC Drives", 1986
- [4] Hirokazu TAJIMA and Yoichi HORI "Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine" Industry Applications Society Annual Meeting vol .1, PP. 385-391, 1991