

## 유도전동기 센서리스 벡터제어 시스템 모델의 페이저 해석

이학주\* 황재호\*\* 성세진\*\*  
\* 전력연구원 \*\*충남대학교 전기공학과

### Phasor Analysis of Sensorless Vector Control System Model for Induction Motor

\*H.J. Lee, \*\*J.H.Hwang, \*\*S.J.Seong  
\* KEPRI \*\* Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l Univ.

**Abstract** - This paper deals with the design of a field oriented control system model for the high performance induction motor using Matlab with Simulink. The proposed control system model, which is not used the speed and flux sensor, contains IM model, Transformation, Decoupling, FFOC(Field Flux Orientation Controller), Torque calculator and PI Controller to control speed, torque.

Results present the stator and rotor flux phasor trajectory, the startup and transient response of speed, torque and stator current with field oriented control and the response to changes in reference speed with no load.

This paper shows that the propose control system is more robust than the other vector control system, and suggest the enchanced model, using Matlab with Simulink for the high performance in induction motor control.

#### 1. 서 론

유도전동기는 구조가 간단하고 유지보수가 용이하지만 파라미터가 온도변화, 포화, 및 표피효과 등에 의해 변동되고 구동시스템은 전압과 주파수등을 제어입력으로 하며, 속도, 토크, 공극자속 고정자 전류등을 출력으로 하는 다변수 제어의 비선형시스템이다. 전동력 응용분야의 중심기술인 가변속 제어는 유도전동기의 성능향상을 위하여 벡터제어 이론을 적용한다. 벡터제어는 유도전동기에 입력되는 3상 전류를 q축과 d축의 성분으로 각각 독립적으로 분리하여 직류전동기와 같이 토크 및 속도를 제어하는 방식이다.

동기 기준좌표계에서 공극전압  $\bar{V}_g$ 을 q축에 일치시키고 공극자속  $\bar{\Psi}_m$ 를 d축에 일치시킨다. 고정자 전류  $\bar{I}_s$ 는 공극전압  $\bar{V}_g$ 에 대해  $(90 - \phi)$ 만큼 뒤쳐지게 되며, 이때 고정자 전류  $\bar{I}_s$ 을 q축 성분  $i_{qs}$ 과 d축 성분  $i_{ds}$ 로 나눌 수 있는데,  $i_{qs}$ 는 토크성분의 고정자 전류이며,  $i_{ds}$ 는 자속성분의 고정자 전류이다. 토크는 자속과 직각이 되고 식(1)과 같다.

$$T_{em} = K_a |\bar{\Psi}_m| i_{qs} = K_t i_{qs} i_{ds} \quad (1)$$

$i_{qs}$ 와  $i_{ds}$ 의 Phasor Diagram은 그림 1과 같다.

$$\begin{aligned} i_{qs} &= \bar{I}_s \sin \phi \\ i_{ds} &= \bar{I}_s \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

위상각  $\phi$ 는 고정자 전류와 동기 기준좌표계의 공극자속과의 위상차이다. 벡터제어는 위상각을 구하는 방법에 의해 공극자속을 이용하는 직접 벡터제어방식과 회전자의 속도를 측정하여 구하는 간접 벡터제어방식으로 분류한다.

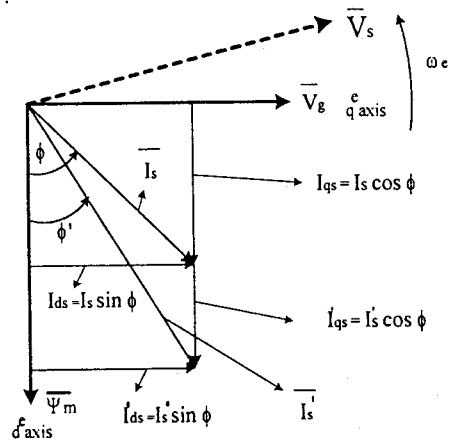


그림1. 벡터제어시스템 Phasor Diagram

본 논문에서는 Simulink를 이용하여 속도나 자속센서없이 FFOC(Field Flux Orientation Control)에서 직접 자속을 계산하여 센서리스 방식으로 직접벡터제어 시스템을 구성하고 있다. 또한, 제어시스템의 속도 및 토크응답과 고정자, 회전자 전류의 페이저를 시뮬레이션을 통하여 제시하였으며, 제안한 시스템의 시뮬레이션 결과는 유도전동기의 제어 성능향상 및 강인성을 확인하고 있다.

#### 2. 직접 벡터제어

그림1은 유도전동기 직접벡터 전압제어의 기본적인 원리를 나타내고 있으며, 전체 시스템의 구성은 Simulink를 이용하여 그림 2에 나타내고 있다. 단위벡터  $\cos \phi$ ,  $\sin \phi$ 의 위상각  $\phi$ 을 구하는데 있어서 직접 측정된 공극자속  $\bar{\Psi}_{mq}^s$ ,  $\bar{\Psi}_{ma}^s$ 을 이용하거나 또는 고정자 입력측 전압 및 전류로부터 공극자속을 계산한다. 자속을 계산하는데 있어서 회전자 자속이 공극자속보다도 제어 시스템에서는 더 중요하게 되며 계산식에서는 회전자 자

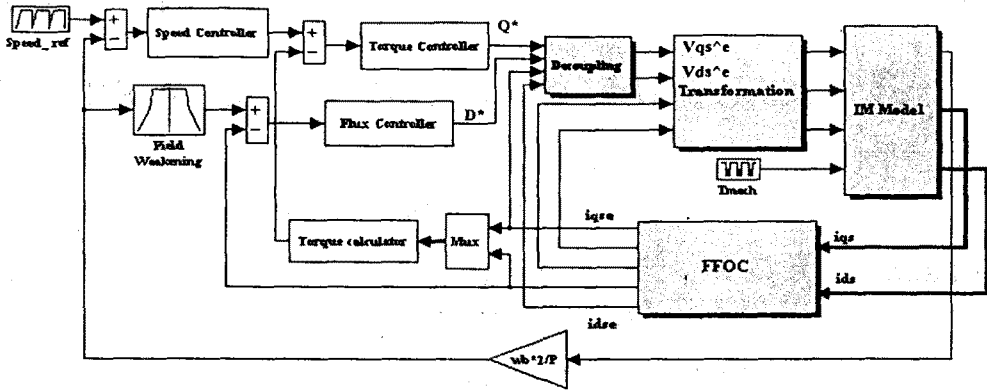


그림 2. 직접 벡터제어 시스템의 구성도

$$Q^* = V_{qs}^e - \omega_e L_s i_{ds}^e$$

$$D^* = V_{ds}^e - \omega_e L_s i_{qs}^e$$

속을 포함하여 제어를 하여야 한다. 따라서 회전자 누설 자속으로 보상된 공극자속의 식을 보면 다음과 같다.

$$\overline{\Psi_{qr}^s} = L_m i_{qs}^s + L_r i_{qr}^s \quad (3)$$

$$\overline{\Psi_{qm}^s} = L_m i_{qs}^s + L_m i_{qr}^s \quad (4)$$

식 (3)로부터  $I_{qr}^s$ 를 제거하면

$$\overline{\Psi_{qr}^s} = L_m i_{qs}^s + L_r i_{qr}^s \quad (5)$$

비슷하게 d축을 계산하면,

$$\overline{\Psi_{dr}^s} = L_m i_{ds}^s + L_r i_{dr}^s \quad (6)$$

따라서 공극자속은 회전자 자속으로 변환하게 되며, 단 위벡터는 다음식으로 구할 수 있다.

$$|\overline{\Psi_r}| = \sqrt{(\overline{\Psi_{dr}^s})^2 + (\overline{\Psi_{qr}^s})^2} \quad (7)$$

$$\cos \phi = \frac{\overline{\Psi_{dr}^s}}{|\overline{\Psi_r}|} \quad (8)$$

$$\sin \phi = \frac{\overline{\Psi_{qr}^s}}{|\overline{\Psi_r}|} \quad (9)$$

직접벡터제어에서는 전류루프 안에서 전압 제어 방식의 인버터를 가질 수 있다. 순시적인 위상전류명령은 실제 위상전류와 비교되고 이에 대한 오차는 PI보상기를 통하여 위상전압 명령을 발생하게 된다.

명령치 고정자 기준좌표 고정자 전압  $v_{qs}^{**}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^{**} \\ v_{ds}^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^* \\ v_{ds}^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

결과적으로 위상전압 명령치 a, b, c상전압은 qd축 전압을 a, b, c축으로 변환하여 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{bmatrix} v_{as}^{**} \\ v_{bs}^{**} \\ v_{cs}^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^{**} \\ v_{ds}^{**} \end{bmatrix} \quad (11)$$

그림2는 본 논문에서 제안하고 있는 센서리스방식의 자속기준 벡터제어 시스템의 구성도로 Matlab with Simulink를 이용하였다. 시스템은 유도전동기 모델, 자속을 계산하기 위한 FFOC (Field Flux Orientation Control) 및 정상상태의 오차를 영으로 하기 위하여 속도 및 토오크, 자속에 PI제어기를 적용하였다. 또한 Decoupling은 다음과 같이 구성하였다.

### 3. 시스템 시뮬레이션

자속 기준 벡터제어 시스템의 과도상태 해석을 위하여 제안한 제어시스템 모델을 시뮬레이션하였다. 본 논문에서 대상으로 하고 있는 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

고정자 저항 ( $r_s$ )	0.1062 $\Omega$	종류	농형
회전자 저항 ( $r_r$ )	0.0764 $\Omega$	마력	20-hp
고정자 리액턴스 ( $x_k$ )	0.2145 $\Omega$	전압	220-V
회전자 누설 리액턴스 ( $x_{lr}$ )	0.2145 $\Omega$	주파수	60(Hz)
자화 누설 리액턴스 ( $x_m$ )	5.834 $\Omega$	극수(P)	4(pole)
J(관성계수)	2.8( Kg/m <sup>2</sup> )		

표1. 유도전동기 파라미터

시뮬레이션 결과로 그림3.a에 무부하 상태의 가변기 준속도에 대한 속도응답, 그림3.b는 고정자 전류파형을 나타내고 있으며, 그림3.c는 토오크 응답이다. 또한 그림4.a.b는 자속기준 벡터제어 시스템의 고정자 자속과 회전자 자속의 궤적을 나타내고 있다.

제안한 자속기준 벡터제어 시스템의 기동과 부하시 과도응답파형을 나타내고 있다. 그림5.a는 기준속도에 대한 속도응답을, 5.b는 고정자 전류파형, 5.c는 토오크 응답이다. 그리고 그림6.a.b에 고정자자속과 회전자 자속궤적의 궤적을 보이고 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기 제어성능 향상을 목적으로 자속기준 벡터제어 시스템을 모델링하였으며, 이에대한 부하시 기동과 과도상태의 속도, 토오크 및 고정자 전류 파형을 시뮬레이션을 통하여 제시하였으며, 가변 기준속도에 대한 속도, 토오크 및 고정자 전류 파형을 보이고 있다. 또한 두가지 상태에 있어서의 회전자 및 고정자 자속의 궤적 궤적을 나타내고 있다. 이를 통하여 자속 기준 벡터제어 시스템의 상세한 모델을 제시하였으며, 제안한 제어 시스템의 강인성을 확인하였다. 더욱 향상된 모델 개발을 위하여 속도, 토오크 추정을 위한 PI제

여기의 상세설계가 요구된다.

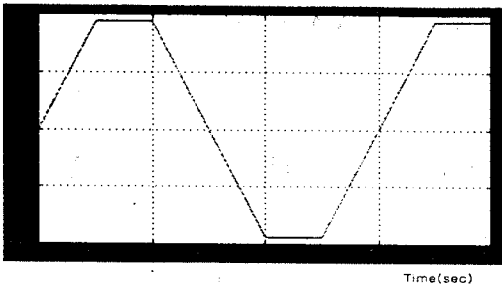


그림 3.a 속도 응답

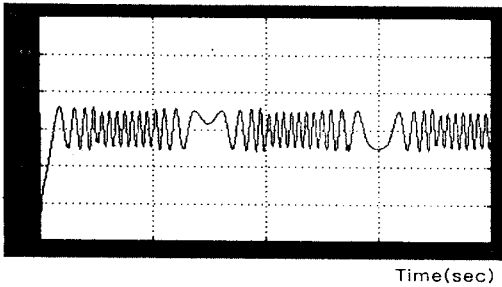


그림 3.b 고정자 전류 파형

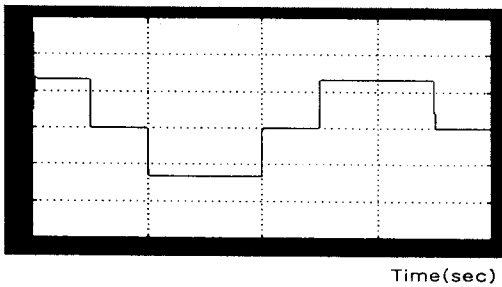


그림 3.c 토크 응답

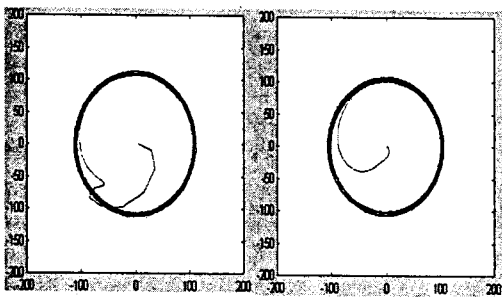


그림 4.a 고정자 4.b 회전자자속 페이저

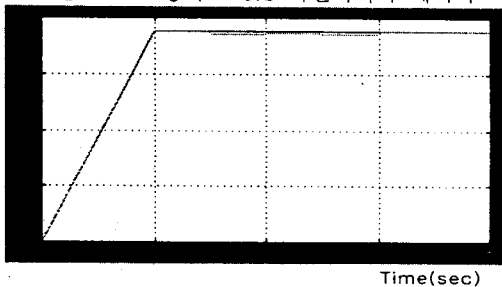


그림 5.a 속도 응답

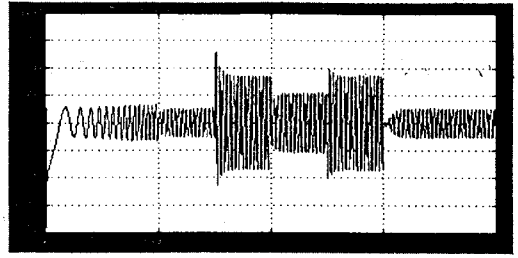


그림 5.b 고정자 전류 파형

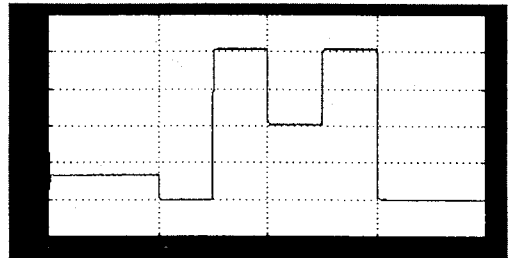


그림 5.c 토크 응답

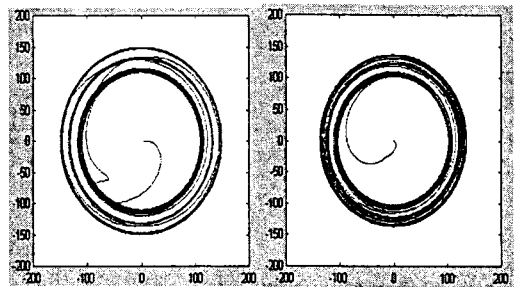


그림 6.a 고정자 6.b 회전자자속 페이저

(참 고 문 헌)

- [1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", PrenticeHallPTR, 1998
- [2] Rajin Mathow, Dan Houghton, Wardina Oghanna, "Vector Control Techniques for Induction Motors", '95 PEDS, Vol2, pp.813-818, 1995.
- [3] Teodor Pana, Yoichi Hori, "A Matlab for Field-Oriented Induction Motor System Design", '94 Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation, pp.1203-1210, 1994.
- [2] Teodor Pana, Yoichi Hori, "Simultaneous Speed Estimation and Rotor Flux identification for Sensorless Induction Motor Drive", '94 JIASC pp.135-140, 1994.