

공간전압 벡터제어를 통한 유도전동기의 새로운 벡터제어성능연구

변운섭\*, 장동욱  
한국철도기술연구원

A new vector control performance for induction motor with SVPWM

Yeun-Sub Byun, Dong-Uk Jang  
KRRRI(Korea Railroad Research Institute)

**Abstract** - This paper presents a new vector control scheme for induction motor. An exact knowledge of the rotor flux position is essential for a high-performance vector control. The position of the rotor flux is measured in the direct schemes and estimated in the indirect schemes. Since the estimation of the flux position requires a priori knowledge of the induction motor parameters, the indirect schemes are machine parameter dependent. The rotor and stator resistance among the parameters change with temperature. Variations in the parameters of induction machine cause deterioration of both the steady state and dynamic operation of the induction motor drive. Several methods have presented to minimize the consequences of parameter sensitivity in indirect scheme. In this paper, new estimation scheme of rotor flux position is presented to eliminate sensitivity due to variation in the resistance. The simulation is executed to verify the proposed vector control performance and to compare its performance with that of indirect and direct vector control.

1. 서 론

유도전동기의 벡터제어는 회전자 자속의 위치를 찾는 방법에 따라 직접벡터제어와 간접벡터제어로 구분된다. 직접벡터제어는 자속을 직접 측정하거나 자속 추정기를 통하여 회전자 자속의 위치를 알아내고 간접벡터제어는 전동기의 회전속도에 슬립속도를 더해 그 적분한 값으로 회전자 자속의 위치를 구한다. 직접벡터제어에서 자속을 직접 측정하기 위해서는 전동기에 추가적인 센서가 필요함으로 비용이 상승하게 된다. 따라서 직접벡터제어에서는 자속을 추정하는 방법을 주로 사용한다. 직접벡터제어에서 자속을 추정하거나 간접벡터제어에서 슬립을 추정할 때에 전동기 파라미터를 사용하게 된다. 전동기의 파라메타 중 회전자저항이나 고정자 저항값은 전동기의 장시간 운전의 경우 온도상승에 의해 그 값이 크게 변하게 되고 이에 따라 자속의 위치를 정확히 추정하지 못하게 된다. 결국 유도전동기의 벡터제어를 통한 토크 및 속도제어 응답특성에 악영향을 미친다. 이를 보상하기 위해 현재 까지 많은 연구는 온도에 따라 변하는 회전자저항과 고정자저항값에 대한 정확한 추정을 위해 다양한 기법들이 제시되고 있다. 본 논문에서는 회전자 자속의 위치를 알기 위해 회전자 저항이나 고정자 저항값이 요구되지 않는 새로운 벡터제어방법을 제시하고 공간벡터제어를 통한 모의실험을 통해 인버터 활용시 제어성능을 추정한 다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 모델링

회전좌표축  $d^e - q^e$  등가회로에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{qse} = R_s i_{qse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} + \omega_e \psi_{dse} \quad (1)$$

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} - \omega_e \psi_{qse} \quad (2)$$

$$v_{qre} = R_r i_{qre} + \frac{d\psi_{qre}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dre} \quad (3)$$

$$v_{dre} = R_r i_{dre} + \frac{d\psi_{dre}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qre} \quad (4)$$

$$\psi_{qre} = L_r i_{qre} + L_m i_{qse} \quad (5)$$

$$\psi_{dre} = L_r i_{dre} + L_m i_{dse} \quad (6)$$

$$\psi_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{qre} \quad (7)$$

$$\psi_{dse} = L_s i_{dse} + L_m i_{dre} \quad (8)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{dr} i_{qs}) \quad (9)$$

여기서,  $\omega_e$ 는 동기 각속도,  $\omega_r$ 은 회전자 각속도,  $T_{em}$ 은 토크

2.2 간접벡터제어의 회전자 자속각  $\theta_e$  추정

식(5), (6)에서 회전자 전류  $i_{qre}, i_{dre}$ 는

$$i_{qre} = \frac{1}{L_r} \psi_{qre} - \frac{L_m}{L_r} i_{qse} \quad (10)$$

$$i_{dre} = \frac{1}{L_r} \psi_{dre} - \frac{L_m}{L_r} i_{dse} \quad (11)$$

위해식(3), (4)에서 회전자전류  $i_{qre}, i_{dre}$ 를 제거하기 식(10), (11)을 대입하면

$$R_r \left( \frac{1}{L_r} \psi_{qre} - \frac{L_m}{L_r} i_{qse} \right) + \frac{d\psi_{qre}}{dt} + \omega_{sl} \psi_{dre} = 0 \quad (12)$$

$$R_r \left( \frac{1}{L_r} \psi_{dre} - \frac{L_m}{L_r} i_{dse} \right) + \frac{d\psi_{dre}}{dt} - \omega_{sl} \psi_{qre} = 0 \quad (13)$$

여기서  $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$ ,

비간섭 제어시 조건식

$$\psi_{qre} = \frac{d\psi_{qre}}{dt} = 0, \psi_{dre} = \hat{\psi}_r = constant, \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0 \quad (14)$$

식(13)에서 비간섭 조건식(14)를 이용하여 식(15)를 얻고

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (L_m i_{dse} - \hat{\psi}_r) \quad (15)$$

식(12)에서 비간섭 조건식(14)를 이용하여 슬립속도계산식(16)을 얻어

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\hat{\psi}_r} \left( \frac{R_r}{L_r} \right) i_{qse} \quad (16)$$

슬립속도 식(16)을 다시 정리하면

$$\omega_{sl} = \left( \frac{R_r}{L_r} \right) \frac{i_{qse}}{i_{dse}} \quad (17)$$

슬립속도에 모터 회전속도 더하여 회전각 각속도를 구하고

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r \quad (18)$$

최종적으로 회전자 자속각을 식(19)과 같이 구한다.

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (19)$$

### 2.3 직접벡터제어의 회전자 자속각 $\theta_e$ 추정

고정자 전압, 전류로부터 고정자 자속을 구하고

$$\psi_{dss} = \int_0^t (v_{dss} - R_s i_{dss}) dt, \quad \psi_{qss} = \int_0^t (v_{qss} - R_s i_{qss}) dt$$

이를 통해 회전자 자속을 구한다.

$$\psi_{drs} = \frac{L_r}{L_m} (\psi_{dss} - \sigma L_s i_{dss}), \quad \psi_{qrs} = \frac{L_r}{L_m} (\psi_{qss} - \sigma L_s i_{qss})$$

$$\sigma L_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$$

회전자 자속으로 부터 다음과 같이 회전자 자속각을 구한다.

$$\theta_e = \tan^{-1}(\psi_{qrs} / \psi_{drs})$$

### 2.4 제안된 벡터제어

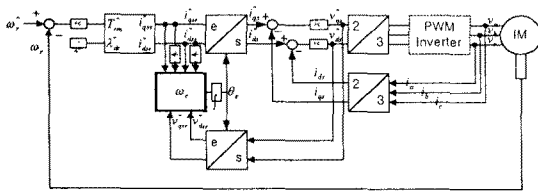


그림 1. 제안된 벡터제어 블록선도

#### 2.4.1 새로운 회전자 자속각 $\theta_e$ 추정

회전좌표축  $d^e - q^e$  등가회로에서 고정자측 전압관계 식은

$$v_{ase} = R_s i_{ase} + \frac{d\psi_{ase}}{dt} + \omega_e \psi_{dse} \quad (20)$$

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} - \omega_e \psi_{ase} \quad (21)$$

식(20)에  $i_{dse}$ 를 곱하면

$$v_{ase} i_{dse} = R_s i_{ase} i_{dse} + \frac{d\psi_{ase}}{dt} i_{dse} + \omega_e \psi_{dse} i_{dse} \quad (22)$$

식(21)에  $i_{qse}$ 를 곱하면

$$v_{dse} i_{qse} = R_s i_{dse} i_{qse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse} - \omega_e \psi_{ase} i_{qse} \quad (23)$$

고정자측 저항  $R_s$ 이 포함된 항을 제거하기 위해 식(22) 식-식(23)식을 하면

$$v_{ase} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} = \frac{d\psi_{ase}}{dt} i_{dse} - \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse} + \omega_e (\psi_{dse} i_{dse} + \psi_{ase} i_{qse}) \quad (24)$$

식(24)식을 동기각속도  $\omega_e$ 에 대해 정리하면 식(25)식이 된다.

$$\omega_e = \frac{v_{ase} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \frac{d\psi_{ase}}{dt} i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse}}{\psi_{dse} i_{dse} + \psi_{ase} i_{qse}} \quad (25)$$

식(25)에서 고정자측 자속을 고정자 전류에 관한식으로 변환을 위해 정상상태에서 비간섭제어 조건식(26)을 고려하면 고정자측 자속은 다음과 같이 정리된다.

$$\psi_{qre} = \frac{d\psi_{qre}}{dt} = 0,$$

$$\psi_{dre} = \hat{\psi}_r = L_m i_{dse}, \quad \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \psi_{qse} &= L_s i_{qse} + L_m i_{qre} \\ &= \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{qre} = \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \psi_{dse} &= L_s i_{dse} + L_m i_{dre} \\ &= \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{dre} \\ &= \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse} + \frac{L_m}{L_r} L_m i_{dse} = L_s i_{dse} \end{aligned} \quad (28)$$

따라서 식(25)에 식(27), (28)을 대입함으로써 동기각 속도가 구해지고 지령전류가 급격히 변하지 않는다면 식(29)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \omega_e &= \frac{v_{ase} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{dse}}{dt} i_{dse} + L_s \frac{di_{dse}}{dt} i_{qse}}{\left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse}^2 + L_s i_{dse}^2} \\ &\approx \frac{v_{ase} i_{dse} - v_{dse} i_{qse}}{\left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse}^2 + L_s i_{dse}^2} \end{aligned} \quad (29)$$

결국 회전자 자속각  $\theta_e$ 은  $\theta_e = \int \omega_e dt$ 로 구할 수 있다.

식(29)에서 볼 수 있듯이 식 자체에 고정자 저항이나 회전자 저항을 볼 수 없다. 따라서 이들 저항 변화의 영향력을 배제시킬 수 있다.

## 3. 시뮬레이션

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션은 수행하였다. 그 제어성능을 기존의 간접벡터 제어 기법, 직접벡터제어기법과 비교하였다. 또한 인버터 적용시 제어성능을 모의하기 위해 SVPWM기법을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표1은 시뮬레이션에 사용된 유도전동기 사양과 상수이다. 시뮬레이션 조건은 0.5초에 1000(rpm)의 속도지령과 100(Nm)의 부하를 가하였다. 표2는 유도전동기 상수를 독립적으로 변화시키면서 시스템이 1초 이내에 목표속도에 도달하는 최대 허용범위를 구한 것이다. 비교표에서 볼 수 있듯이 고정자 저항값  $R_s$ 에 대해서는 간접벡터제어기법이 가장 넓은 허용범위를 갖고 회전자 저항값  $R_r$  변동에 대해서는 제안한 벡터제어기법이 가장 넓은 변동범위를 허용했다. 실제 운전 영역에서의 변동폭을 고려하면 제안된 벡터제어기법이 두 저항변동에 대해 보다 안정적이라 할 수 있다.

그림 2와 3은 간접벡터제어시 회전자 저항값  $50 * R_r$ 과  $0.2 * R_r$ 로 고정시키고 선형제어전압을 인가했을 경우 시험결과를 나타낸다. 저항값 변화로 인하여 회전자 자속각을 적절히 추정하지 못하여 목표속도 추종, 전류, 토크 등이 원활하게 제어되지 못하였다. 그림 4와 5는 직접벡터제어시 회전자 저항값  $50 * R_r$ 과  $0.2 * R_r$ 로 고

정시키고 선형제어전압을 인가했을 경우 시험결과를 나타낸다. 역시 저항값 변화로 인하여 회전자 자속각을 적절히 추정하지 못하여 목표속도 추종, 전류, 토크 등의 응답특성이 원활하게 제어되지 못하였다. 그림 6와 7은 제안벡터제어에서 회전자 저항값  $50 \cdot R_r$ 과  $0.2 \cdot R_r$ 로 고정시켰을 경우 시험결과로 기존의 방법들 보다 나은 속도추종 및 토크, 전류 응답특성을 보이고 있다. 그림 8~11은 인버터제어시 특성을 관측하기 위해 전동기 제어입력으로 SVPWM기법을 적용하여 전압을 인가하였을 경우이다. 제안한 벡터제어의 경우 PWM파형의 전압인가로 인하여 토크의 잔 펄스는 관측되나 목표속도 추종에 있어서 선형 전압인가시 결과와 같은 결과를 보였다.

표 1. 유도전동기 사양 및 상수

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| 정격출력                | 75[kW]                   |
| 정격전압 ( $V_{rate}$ ) | 380[V]                   |
| 고정자저항 ( $R_s$ )     | 0.04745( $\Omega$ )      |
| 회전자저항 ( $R_r$ )     | 0.01689( $\Omega$ )      |
| 고정자인덕턴스 ( $L_s$ )   | 0.00745[mH]              |
| 회전자인덕턴스 ( $L_r$ )   | 0.00759[mH]              |
| 상호인덕턴스 ( $L_m$ )    | 0.0072[mH]               |
| 극수 ( $P$ )          | 6극                       |
| 모터관성 ( $J_m$ )      | 4.25[kg·m <sup>2</sup> ] |

표 2. 시뮬레이션 결과

| 제어방식     | 최대 허용범위(1초내 목표속도 도달) |                 |
|----------|----------------------|-----------------|
|          | 회전자저항 ( $R_r$ )      | 고정자저항 ( $R_s$ ) |
| 간접벡터제어   | 50~700%              | 0~2800%         |
| 직접벡터제어   | 40~190%              | 70~200%         |
| 제안한 벡터제어 | 20~8000%             | 0~900           |

#### 4. 결론

본 논문에서는 유도전동기 벡터제어에 있어서 난점으로 제시되고 있는 온도 변화에 따른 회전자 및 고정자 저항값 변동에 영향을 받지 않는 새로운 회전자 자속각 추정기법을 제시하였다. 기존의 간접벡터제어 및 직접벡터제어에 있어서 회전자 자속각 추정이 직간접적으로 영향을 받은 회전자 및 고정자 저항값을 배제시킴과 동시에 저항값 추종을 위한 많은 노력과 프로그램 수행시간 단축에 유리할 것으로 보며 넓은 환경조건에서 정밀한 유도전동기제어에 활용될 것으로 기대된다.

#### (참고 문헌)

- (1) Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery" Prentice Hall PTR, pp.433-440
- (2) Jong-Jin Jung, Deuk-Kee Lee, Heung-Geun Kim "Direct Vector Control of Induction Motor with Compensator of Stator Resistance", Trans. KIEE, Vol 48B, No 10, OCT 1999, pp. 555-561
- (3) Scott Wade, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", IEEE Transactions on Power Electronics, VOL 12, NO. 3, MAY 1997, pp.495-505

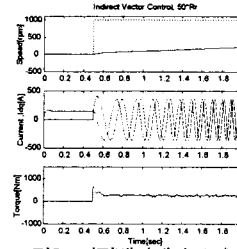


그림2. 간접벡터제어  $50 \cdot R_r$

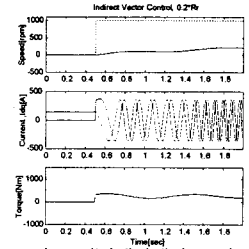


그림3. 간접벡터제어  $0.2 \cdot R_r$

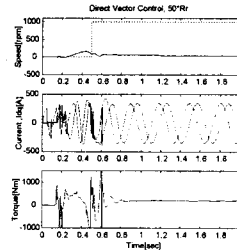


그림4. 직접벡터제어  $50 \cdot R_r$

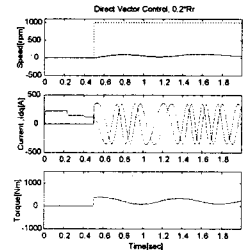


그림5. 직접벡터제어  $0.2 \cdot R_r$

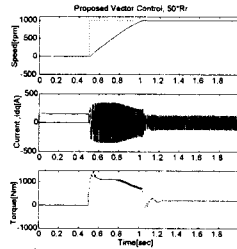


그림6. 제안벡터제어  $50 \cdot R_r$

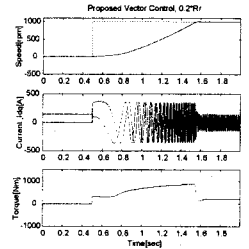


그림7. 제안벡터제어  $0.2 \cdot R_r$

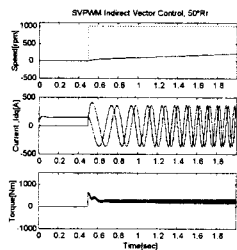


그림8. SVPWM 간접벡터제어

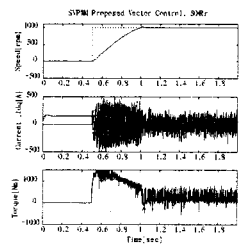


그림9. SVPWM 제안벡터제어

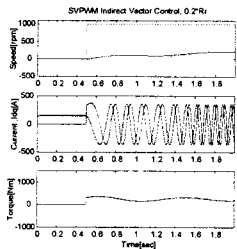


그림10. SVPWM 간접벡터제어

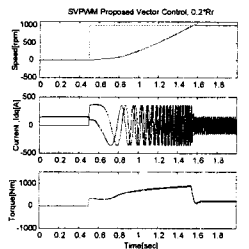


그림11. SVPWM 제안벡터제어