

## 속도검출기가 없는 권선형 유도전동기 벡터제어

이 홍 희, 배 정 용

울산대학교 전기전자 및 자동화공학부

### Vector Control of Wound Rotor Induction Motor without Speed Sensor

HONG-HEE LEE, JUNG-YONG BAE

School of Electrical Eng. and Automation, Univ. of ULSAN

#### Abstract

산업 현장에서 널리 사용되고 있는 권선형 유도전동기의 완전한 벡터제어를 속도 검출기를 사용하지 않고 슬립 주파수를 추정하여 구현할 수 있는 알고리즘을 제안했다. 기존의 센서리스 벡터제어 알고리즘은 전동기의 저항의 변동에 대하여 아주 민감하지만 본 논문에서 제안된 알고리즘은 여자 전류 및 슬립주파수 측정에 전동기 2차 저항을 필요로 하지 않아 전동기 정수 변동으로 인한 벡터제어의 불완전함을 제거했다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 우수한 특성과 그 타당성을 확인을 하였다.

#### I. 서론

산업 현장에서 물류 운반용으로는 크레인이나 호이스트가 사용되고 있으며 여기에 사용되는 대부분의 전동기는 권선형 유도 전동기이다. 권선형 유도전동기는 슬립링과 브러시를 통해 외부 저항을 삽입하여 2차 저항의 크기를 가감하여 속도제어를 행하고 있으며 이는 저항기와 같은 기계적인 부가 장치로 인하여 주기적인 보수를 필요하다<sup>[6]</sup>.

크레인이나 호이스트용 구동 전동기는 넓은 범위의 속도제어와 동적 토크 특성이 좋아야 하며 벡터제어 기법은 이러한 요구 조건을 잘 만족하고 있다. 벡터제어 기법은 전동기의 고성능, 고정밀 속도 제어를 가능하게 하나 이를 구현하기 위해서는 레졸버나 펄스 엔코더와 같은 기계적인 속도 센서를 이용하여 회전자의 정확한 속도 정보를 얻어야 한다. 하지만 이

러한 기계적인 센서는 주변환경이나 전동기의 설치조건에 따라서 어려운 경우가 많다. 특히 이미 전동기가 설치된 환경에서는 더욱 그러하다. 이에 최근에는 이런 기계적인 센서를 통한 속도 정보를 얻기보다는 추정된 속도 정보를 이용하여 전동기를 운전하는 것에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>[1]-[5]</sup>.

초기 센서리스 연구는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 대부분 채택하고 있다<sup>[7]</sup>. 하지만 고정자 전압과 전류는 부하의 상태나 온도에 따라 가변하는 고정자 및 회전자 저항을 이용하므로 만족할 만한 결과를 얻기가 힘들다. 특히 전압을 이용하게 되면 별도의 하드웨어가 추가되어야 한다. 그러나, 전류만으로 속도나 위치 정보를 이용하게 되면 부가적인 하드웨어를 제거할 수 있으며 특히 이미 장착된 시스템에 전류 센서만을 추가함으로써 적용이 가능하다.

본 논문에서는 권선형 유도전동기의 고정자 및 회전자 전류만을 사용해 슬립주파수를 추정하고 이를 통해 회전자 속도를 간접적으로 추정하여 완벽한 벡터제어를 구현할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 기존에 설치되어 있는 권선형 유도전동기에 별도의 속도 검출기를 장착하지 않고 전동기 전류만을 측정하여 구현할 수 있기 때문에 기존의 전동기를 그대로 사용하는 것이 가능하다. 또한 기존의 벡터제어와는 달리 회전자 저항을 사용하지 않고 슬립 주파수와 여자 전류를 검출할 수 있어 정확한 벡터제어와 함께 동특성을 현저히 향상시킬 수 있다.

컴퓨터에 의한 디지털 시뮬레이션을 통해 제안된 속도 추정 알고리즘의 우수성과 타당성을 입증해 보인다.

## II. 센서리스 벡터제어

<그림1>은 본 논문에서 사용한 2상 기준좌표계를 나타내고 있으며 고정자 전류, 회전자 전류 및 여자 전류를 포함하는 벡터도이다.  $\alpha$ - $\beta$ 축은 고정좌표계,  $d$ - $q$ 축은 동기속도로 회전하는 동기좌표계, 그리고  $x$ - $y$ 축은 회전자 속도로 회전하는 회전좌표계를 의미한다. 여기서  $\alpha$ 축은 고정자 a상 방향이며  $x$ 축은 회전자의 a상 방향을 표시한다.

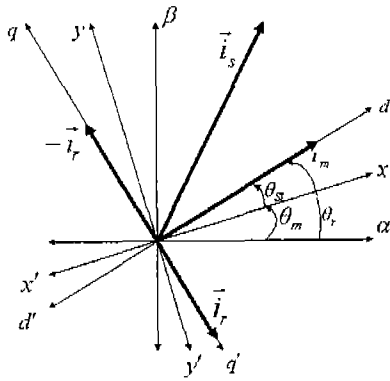


그림 1. 2상 기준좌표계

<그림1>에서 동기 속도 ( $\omega_e$ )로 회전하는 유도전동기의 전압방정식은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$v_s = R_s i_s + \frac{d \lambda_s}{dt} \quad (1)$$

$$v_r = R_r i_r + \frac{d \lambda_r}{dt} + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2)$$

여기서,

$v_s = v_{sd} + jv_{sq}$  : 동기좌표계 고정자 전압벡터

$i_s = i_{sd} + ji_{sq}$  : 동기좌표계 고정자 전류벡터

$i_r = i_{rd} + ji_{rq}$  : 동기좌표계 회전자 전류벡터

$\lambda_s = \lambda_{sd} + j\lambda_{sq}$  : 동기좌표계 고정자 자속벡터

$\lambda_r = \lambda_{rd} + j\lambda_{rq}$  : 동기좌표계 회전자 자속벡터

$\omega_e, \omega_r, \omega_{sl}$  : 동기, 회전자 및 슬립 각속도

이다.

$$\lambda_r = L_r i_r + L_m i_s = \lambda_{rd} + j\lambda_{rq} \quad (3)$$

단,  $L_r$ 은 회전자 자기 인덕턴스,  $L_m$ 은 고정자와 회전자 사이의 상호 인덕턴스이다.

식(3)에서  $i_{mr}$ 을 자화전류라 두면  $d, q$ 축 회전자 자속은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = L_m i_{mr} \\ \lambda_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{aligned} \quad (4)$$

벡터제어가 완전히 이루어 질 경우  $q$ 축 회전자 자속 ( $\lambda_{rq}$ )이 0이 되고  $d$ 축 회전자 자속 ( $\lambda_{rd}$ )이 일정한 값을 가지게 된다. 따라서,  $d$ 축 회전자 자속과 여자 전류의 관계는 식(5)과 같이 되고 고정자 및 회전자  $q$ 축 전류 성분은 식(6)을 만족한다<sup>[7]</sup>.

$$i_{mr} = \frac{\lambda_{rd}}{L_m} = i_{sd} + \frac{L_r}{L_m} i_{rd} \quad (5)$$

$$i_{rq} = -\frac{L_m}{L_r} i_{sq} \quad (6)$$

권선형 유도전동기의 경우 회전자측에서 측정된 전류는 <그림1>의 2상 좌표계에서  $x$ - $y$ 축 상에서의 값이므로 이를 동기좌표계상의 값으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{rd} &= i_{rx} \cos \theta_{sl} + i_{ry} \sin \theta_{sl} \\ i_{rq} &= -i_{rx} \sin \theta_{sl} + i_{ry} \cos \theta_{sl} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 알 수 있는 바와 같이 슬립주파수의 추정 에 의해  $i_{rd}, i_{rq}$ 의 값을 알 수 있다.

한편 <그림1>에서 슬립각 ( $\theta_{sl}$ )은 회전자 전류벡터와 연관되어 있으며 이 전류는 고정자 전류와 회전자 위치에 따라 결정된다. 즉, 고정자  $q$ 축 전류값은 인가 주파수를 알면 구할 수 있고 슬립각 ( $\theta_{sl}$ )은 회전자  $q$ 축 전류에 따라 정해진다. 그런데 벡터제어의 경우 식(6)이 만족되어야 하므로 본 논문에서는 슬립 주파수를 추정하기 위해 식(8)과 같은 PI 제어기를 사용해서 슬립 각속도를 추정했다. 제안된 슬립각속도 추정 블록도는 <그림2>와 같다.

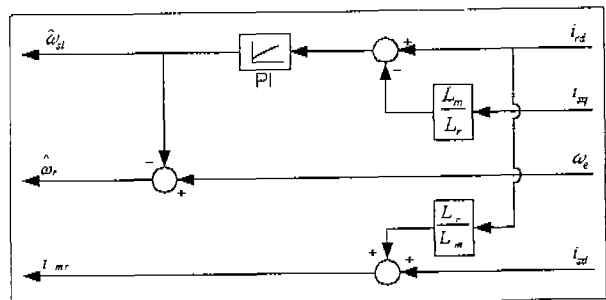


그림 2. 슬립 각속도 추정 블록도

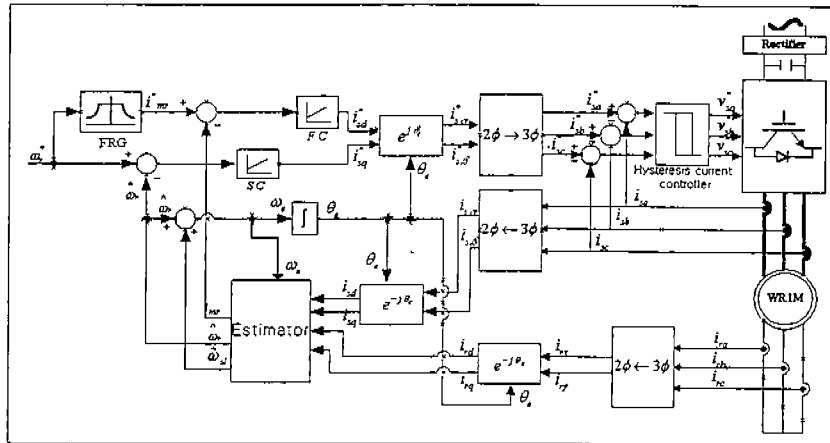


그림 3. 센서리스 제어 블록도

$$\hat{w}_{sl} = K_P e_{id} + K_I \int e_{id} dt \quad (8)$$

여기서  $e_{id} = (i_{rd} - \frac{L_m}{L_r} i_{sq})$ 이다.

본 논문에서 사용한 권선형 유도전동기의 벡터제어 블록도는 <그림3>과 같다. 그림에서 고정자 q축 전류의 지령치는 속도 지령치 ( $i_{sq}^*$ )와 추정 회전자 속도 값을 이용해 구하고 고정자 인가주파수를 알고 있으므로 회전자 속도 추정치는 다음 식과 같이 구해진다.

$$\hat{w}_r = w_e - \hat{w}_{sl} \quad (9)$$

고정자 d축 전류 지령치 ( $i_{sd}^*$ )는 자속 지령치와 실제 자속과의 차를 이용해 구해지는데 실제 여자전류 ( $i_{mr}$ )는 식(5)을 이용해 구할 수 있다. 이 방법은 기존의 벡터제어와는 달리 회전자 전류를 사용하지 않기 때문에 온도 변화에 따른 벡터제어 특성 저하를 방지 할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 결과

제안된 센서리스 알고리즘의 타당성을 디지털 시뮬레이션을 통하여 검증을 하였다. 본 논문에서 사용된 전동기의 정격 및 파라미터는 표 (1)와 같다.

표 (1). 전동기 파라미터 및 정격

주파수	60Hz	Rr	0.6460
극수	4 poles	Ls	83.97mH
정격 전압	220V	Lr	85.28mH
정격 출력	2.2Kw	Lm	81.36mH
정격 속도	1733rpm	Inertia	0.0367Kg-M <sup>2</sup>
Rs	0.6865	Friction	0.003Kg-M <sup>2</sup> /sec

표(1)의 파라미터를 이용하여 전동기 지령속도를 500RPM, -500RPM 그리고 500RPM으로 정역운전을 병행시켜 시뮬레이션을 하였다. <그림4>는 속도 센서를 사용하여 기존의 벡터제어 알고리즘으로 구동한 경우와 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 구동한 경우를 속도지령치와 비교해 보인 것이다.

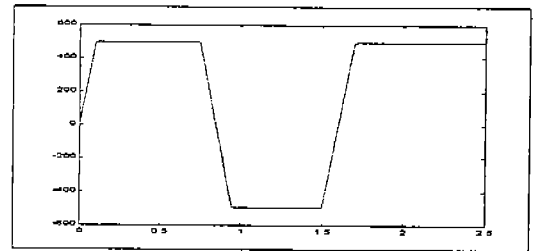


그림 4 a. 속도 지령치

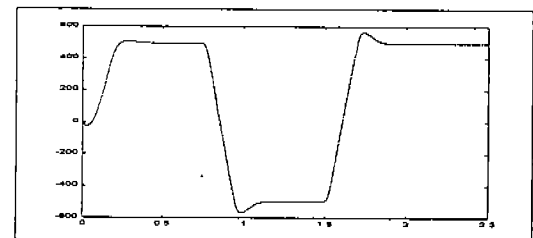


그림 4 b. 기존 벡터제어의 회전자 각속도

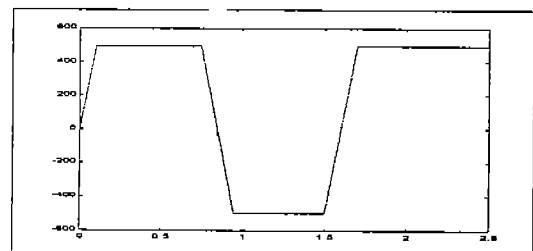


그림 4 c. 센서리스 벡터제어의 회전자 각속도

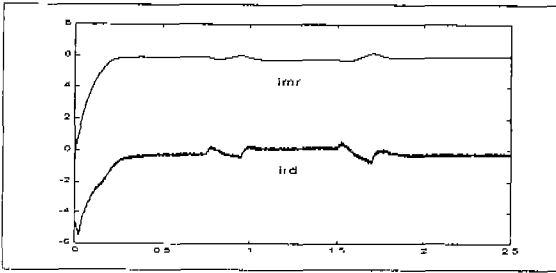


그림 5 a. 기존의 벡터제어의 전류 ( $i_{mr}, i_{rd}$ )

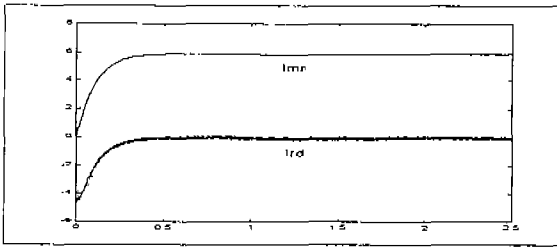


그림 5 b. 센서리스 벡터제어의 전류 ( $i_{mr}, i_{rd}$ )

<그림 5>는 속도 지령치를 <그림 4a>와 같이 변화시킬 경우의 기존 벡터제어와 제안된 센서리스 벡터제어의 여자전류와 회전자 d축 전류를 보인 것이다. 벡터제어가 정확히 이루어 질 경우 정상상태에서 회전자 d축 전류는 0이 되어야 하는데 제안된 센서리스 벡터제어 알고리즘은 이러한 조건을 정확히 만족시켜 주고 있다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 알고리즘에 의한 센서리스 제어 알고리즘의 동특성이 기존의 그것에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다. 이는 슬립 주파수 추정에 의해 전동기 속도 추정이 정확히 이루어지고 있고 2차 전류를 측정하여 완전한 벡터제어가 이루어질 수 있기 때문이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 별도의 부가적인 장치없이 회전자 전류만을 검출하여 기존에 설치되어 있는 권선형 유도전동기의 동특성과 운전조건을 만족시킬 수 있는 센서리스 벡터제어 기법을 개발했다. 즉, 고정자 및 회전자 전류를 측정하여 슬립주파수를 추정하고 이를 통해 회전자 속도를 추정했다.

시뮬레이션 결과 제안된 기법은 속도검출기를 사용하고 있는 기존의 벡터제어 방식보다도 동특성이 월등함을 알 수 있었다. 특히, 회전자 속도 추정 알고리즘은 전동기 저항의 변동에 전혀 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 고정자 d축 전류지령치를 얻기 위해서 사용되는 자화전류 성분 또한 회전자 저항과 무관하게 추정할 수 있어 전동기 정수 변동에 강인하다.

본 알고리즘은 제어가 간편하고 신뢰성이 우수하여

실제 시스템에 적용하기가 대단히 편리하다. 슬립 주파수 PI 제어기를 통해 추정하고 있기 때문에 외란에 대한 신뢰성도 우수한 것으로 판단된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] Tsugutoshi Ohtani, "Vector control of induction Motor without shaft encoder", IEEE Trans. Industry Applications, vol.28, no.1, PP.157-164, 1992.1
- [2] Nicholas P. Rubin, "Evaluation of various slip estimation techniques for an induction machine operating under field-oriented control conditions", IEEE Trans. Industry Applications, vol.28, no.6, PP.1367-1375, 1992.11
- [3] Toshiyuki Kanmachi and Isao Takahashi, "Sensorless speed control of an induction motor with no influence of secondary resistance variation", IEEE IAS Annual Meeting conference record, PP.408-413, 1993
- [4] Ichiro Miyashita, Akio Imanagida and Takashi Koga, "Recent industrial application of speed sensorless vector control in japan", Proceeding IECON'94, PP.1573-1578, 1994
- [5] Hisao Kubota and Kouki Masure, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaption", IEEE Trans. Industry Applications, vol.30, no.5, PP.1219-1224, 1994
- [6] Ruppert Filho, Emesto and Bravo Sanchez, "Control of wound rotor induction machine", Proceeding IEEE'97, PP.97-102, 1997
- [7] Peter Vas, "Sensorless vector and direct torque control", Oxford University Press, 1998
- [8] Young Ahn Kwon and Sung Hwan Kim, "Speed sensorless control of induction motor by current error compensation", IECON'97, PP.966-970, 1997