

# 퍼지 알고리즘을 이용한 유도전동기 간접벡터제어기의 설계와 엘리베이터 속도제어 시스템에의 응용

경제문\*(성균관대 대학원 기계설계학과), 김훈모(성균관대 기계설계학과)

## Design of Indirect Vector Controller of Induction Motor using Fuzzy Algorithm and apply to the Speed Control System of Elevator

J. M. Kyoung(Mech. Eng. Dept., SKKU), H. M. Kim(Mech. Eng. Dept., SKKU)

### ABSTRACT

In general, speed control method of the elevator system has used motor pole change type or motor primary voltage control type. But it will change to vector control type in order to increase its reliability, riding comfort and decrease material cost. It is the conception of vector control that primary current of the induction motor be controlled independently with magnetizing current(field current of DC motor) and torque current(armature current of DC motor). In this paper, by analyzing the effect of the time constant variation of rotor of the induction motor on the slip frequency type indirect vector control, a drive system for the motor will be constructed using a fuzzy slip frequency type indirect vector controller with fuzzy control method for estimating the vector time constant in the slip frequency type indirect vector control. The goal of this study is to enabling even more efficient speed control by constructing on elevator driver based on the newly developed drive system.

**Key Words :** Induction motor(유도전동기), Vector Control(벡터제어), Elevator(엘리베이터), Speed Control system(속도제어시스템), Fuzzy Logic Control(퍼지논리제어), Slip Frequency(슬립주파수), Torque(토크)

### 1. 서론

건물이 고층화되어 가면서 엘리베이터는 고속, 고정밀도를 필요로 하게 되었으며 보다 안전하고 정확한 속도 및 위치제어가 가능한 시스템으로 계속적인 발전이 이루어지고 있다. 엘리베이터는 대부분 전동기로 구동되고 있으므로 엘리베이터의 속도는 전동기의 제어에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

유지 및 보수가 상대적으로 간편한 교류유도전동기는 그 장점에도 불구하고 직류전동기에 비하여 토크 및 속도제어가 어려워 그 동안 사용이 제한적이었다. 그러나, 인버터 제어기술이 발달하여 산업현장에 널리 응용됨에 따라 엘리베이터의 구동시스템에 유도전동기를 적용시킴으로써, 에너지 절감효과와 전원설비 용량 감소, 기구의 소형화, 경량화 및 신뢰성을 향상시킬 수 있게 되었다. 적으로 증가하고 있다. 특히 인버터 제어방식을 이용한 전동기 제어기술 중 유도전동기의 경우 벡터제어기술을 응용

하여 직류 전동기와 동등한 제어를 할 수 있게 됨으로써 초저속도에서 최고속도(정격속도)에 이르기까지 정밀한 제어가 가능하게 되었다. 이러한 인버터 제어방식의 유도전동기를 사용한 엘리베이터 시스템은 고역률 운전을 하기 때문에 전원설비의 용량이 절감되고, 소비 전력량도 크게 감소되므로 에너지 절약형으로 설치 및 운영에 있어 매우 경제적이고, 관련 기기를 소형화 및 경량화 할 수 있을 뿐 아니라, 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.<sup>(2)</sup>

간접 벡터제어는 직접 벡터제어에 비해서 구현이 간단하고 전동기의 전 속도 영역에서 사용할 수 있지만, 슬립 계산 시 포함되는 회전자 시정수의 정확한 설정이 필수적이다. 회전자 인덕턴스와 회전자 저항의 비로 주어지는 회전자 시정수는 고정자 전류로부터 전동기의 슬립 주파수를 결정하는데 사용되며 제어성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히 유도전동기의 회전자 저항은 직접 측정하여

불가능하며 전류, 온도 등의 영향으로 비선형 시변 특성을 가진다

본 연구에서는 시스템 구성에 있어서 간접 벡터 제어기법을 사용하며, 간접 벡터제어에 큰 영향을 미치는 요소인 슬립주파수에 대하여 퍼지 알고리즘을 적용하여 엘리베이터 속도제어에 보다 우수한 정밀성을 보일 수 있는 퍼지 슬립주파수형 간접벡터제어기를 구현하고자 한다. 이를 통해 슬립주파수 계산 시 포함되는 회전자 시정수의 퍼지 알고리즘에 의한 설정이 가능해져 슬립 주파수 오차에서 오는 변화에 능동적으로 대처할 수 있게 된다.

## 2. 슬립주파수에 따른 발생토크의 제어

슬립주파수형 벡터제어는 2차 자속 좌표 상에서의 값으로 자속 성분 전류와 토크 성분의 전류를 구하지만 이것을 정지 좌표 상에서의 1차 전류 값으로 변환하는데 2차 자속 벡터를 검출하지 않고 행할 수 있다. 자속성분 전류와 토크성분 전류에 의하여 결정되는 슬립주파수를 전동기 계수를 이용하여 구하고 이것을 적분하여 구한 위치를 2차 자속의 추정위치로 하여 좌표변환에 이용한다.

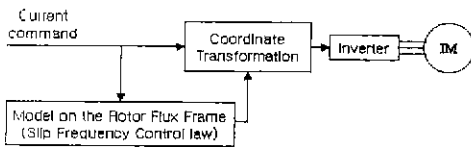


Fig. 1 Indirect vector control diagram

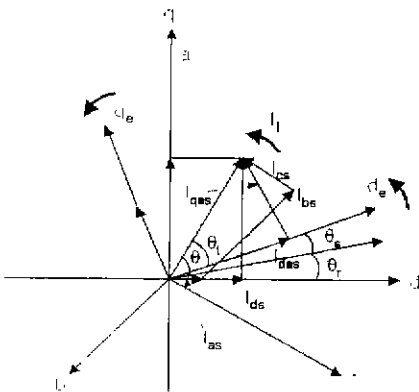


Fig 2 Phasor diagram for indirect vector control

Fig.2에서 볼 수 있듯이 d-q축은 고정자축에 고정되어 있고, d,-q,축은 동기각속도  $\omega_r$ 로 회전하며, 회전자 자속축은 d,축과 일치하며 회전자축에

대해 슬립각  $\theta_s$ 를 유지하면서 회전한다. 따라서 고정자 전류는 여자분 전류  $i_{des}$ 와 토크분전류  $i_{qs}$ 로 분리하여 제어함을 알 수 있다. 회전자의 실제 각속도  $\omega_r$ 과 슬립각속도  $\omega_s$ 의 합은 자속의 회전각속도  $\omega_e$ 가 된다. 식(1)과 식(2)은 회전자의 쇄교 자속 식이다.

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r}(\lambda_{dr} - M i_{ds}) \quad (1)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r}(\lambda_{qr} - M i_{qs}) \quad (2)$$

위의 식을 회전자 전압 방정식에 대입하여 전개하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr} - \frac{M}{L_r} R_r i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qs} - \frac{M}{L_r} R_r i_{qs} - \omega_e \lambda_{dr} = 0 \quad (4)$$

벡터제어를 수행하기 위해 회전자 자속의 크기는 일정한 것으로 보고, 동기좌표계의 d,축과 회전자 자속축을 일치시킨다면  $\lambda_{qs} = 0$  이 된다. 이것을 식(3)과 식(4)에 대입하여 전개하면 식(5)와 식(6)의 수식을 얻을 수 있다.

$$\omega_s = \frac{M}{\tau_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}} \quad (5)$$

$$\lambda_{dr} = M i_{ds} \quad (6)$$

유도전동기의 토크를 구하는 식은 식(7)과 같다.

$$T_r = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{L_r}\right) \lambda_{dr} i_{qs} \quad (7)$$

식(5)의 슬립각속도 지령치에 유도전동기의 실제 회전각속도를 가산하여 적분하여 동기속도로 회전하는 회전자자속 각주파수를 측정할 수 있다.

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_s + \omega_r) dt \quad (8)$$

이때 동기 회전자 좌표계 상에서의 자속성분 전류 및 토크성분 전류의 지령치는 다음과 같다.

$$i_{ds}^* = \frac{1}{M} \lambda_{dr} \quad (9)$$

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \frac{L_r}{L_m} \frac{1}{\lambda_{dr}} T_r \quad (10)$$

따라서 식(8)에서 얻어진 회전자 자속의 위상으로부터 식(9)과 식(10)의 동기 회전자 좌표계 상에서의 자속성분 전류 및 토크성분 전류를 이용하여 고정자 직교좌표계로 변환한 후 다시 3상으로 변환하면 실제로 제어할 수 있는 고정자 좌표계의 3

싱 전류지령치를 얻을 수 있다.

비동조에 의해 자속기준을 잃어버리면 정상상태에서 오차가 발생함은 물론, 과도응답 특성도 변화하게 된다. 특히 토크 지령치의 변화에 대한 순시 토크응답도 맞지 않게 된다. 전동기의 순시토크 응답에 큰 영향을 주는 잘못 추정된 회전자 시정수는 회전자 저항과 회전자 인덕턴스의 비인데, 회전자 저항은 온도에 의해 크게 변화한다.

이러한 온도와 자속의 변화로 전동기 계수가 변화하여 슬립주파수를 잘못 추정하는 것은 벡터제어시 그 결과를 불안정하게 만드는 가장 큰 요인으로 작용한다. 그러므로, 수식에 의해 계산된 결과로부터 추정되는 슬립각 주파수와, 전동기 회전자속도, 발생토크에 따른 최적의 이상적인 슬립주파수 관계에 대하여 퍼지 논리를 적용한다.

### 3. 엘리베이터 속도제어기에의 응용

벡터제어에 의한 엘리베이터 속도제어는 일정한 상용전원을 정류하는 순변환장치(정류기)인 컨버터의 Power Transistor를 사용한 인버터 장치로 구성한다. 제어는 벡터제어와 정현파 PWM제어를 하여 권상기용 유도전동기의 속도를 제어한다. 이 인버터는 전동기의 정회전, 역회전과 각각의 역행, 회생의 4상한 제어를 한다. 주회로는 정류기와 평활 콘덴서에 의해 교류를 직류로 변환하여 전압형 인버터로 유도전동기를 구동한다. 또한 전력변환 장치는 전동기의 정전, 역전과 각각의 역행, 회생에 따른 4상한 운전에 대응토록 구성되어 있다.

엘리베이터의 속도제어부는 속도 지령치와 펄스 발생기(Pulse Generator)에서의 속도신호로 속도를 연산한 값에서 전동기의 슬립주파수(Slip Frequency)를 연산하여 전류제어부로 보내게 된다. 전류제어부는 전류 기준을 연산하며, 그 연산결과를 토대로 PWM제어에 의해 전동기의 토크를 제어한다. 그리고, 인버터로 전동기를 속도 제어하는데 상부 전동기에서 발생하는 토크 맥동을 가능한 감쇄시켜야 하므로 전동기의 입력전류는 정현파가 되도록 제어한다.

Fig. 3은 벡터제어에 의한 중저속 기어식 인버터 제어방식 엘리베이터의 시스템 구성을 나타낸 것이다. 속도제어의 핵심이 되는 부분은 속도지령에 의해 Vector제어가 이루어지는 곳이다. 여기서 나온 출력은 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 인버터 소자로 들어가게 된다. 본 연구에서는 Induction Machine의 벡터 제어부에 Fuzzy 알고리즘을 적용하며 슬립주파수형 간접벡터제어 이론을 적용하였다.

또한 엘리베이터 속도제어의 핵심이 되는 슬립주파수형 간접벡터제어기를 구현함으로써 슬립오차의 추정 및 보상결과를 분석하고, 이에 따른 토크제어 성능 등을 보이고자 한다.

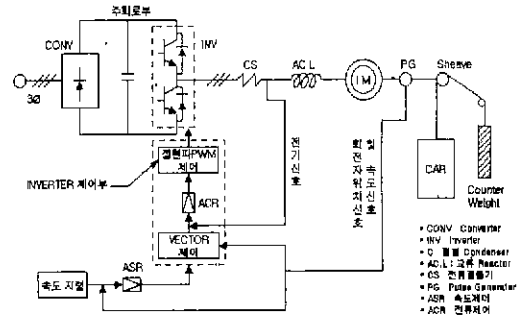


Fig. 3 diagram of vector control-inverter elevator system

Fig.4는 간접벡터제어에 의한 유도전동기 드라이브 구성도이다.

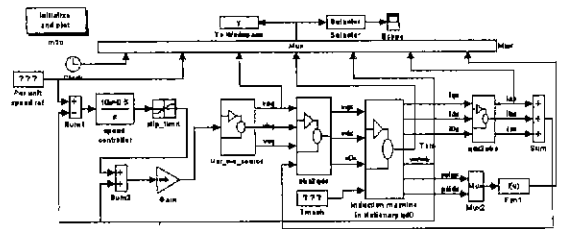


Fig. 4 Design of indirect vector control drive

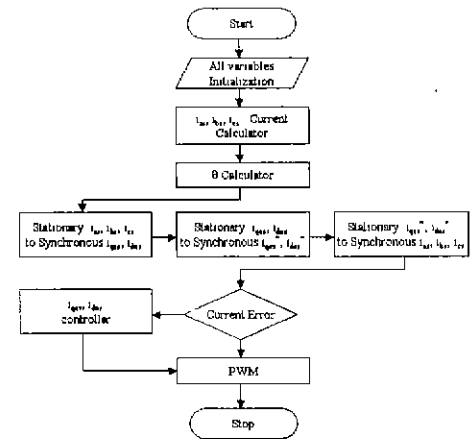


Fig. 5 Flow chart of control algorithm

Fig. 5는 제어 알고리즘 순서도이다.

#### 4. 결과

슬립주파수형 간접벡터제어 알고리즘의 인버터 방식 엘리베이터 속도제어 시스템에의 적용은 전동기의 회전 각속도  $\omega_r$  의 검출로부터 시작된다. 여자전류 지령치  $I_{dref}$  는 검출된 전동기의 회전속도로 결성하며, 토크전류 지령치  $I_{qref}$  는 속도 지령치와 속도 검출량의 차이로부터 결정한다.

사용한 유도전동기 파라미터는  $P_n = 1100W$ ,  $V = 220V$ ,  $2P = 4$ ,  $r_s = 9.5\Omega$ ,  $L = 0.14H$ ,  $L_r = 0.5H$ ,  $L_m = 0.45H$ ,  $J = 0.003kgf\cdot m^2$  이며, 엘리베이터가 출발하는 순간 걸리는 하중에 대하여 속도와 토크의 추이를 보인다. Fig. 6은 속도에 대하여, Fig. 7은 토크에 대하여 보이고 있다. 엘리베이터에 하중이 발생한 후 최초 기동 시 발생토크에 대해 속도는  $t=0.423s$  만에 일정속도를 유지하도록 제어가 되었다. 일시적인 응답으로 빠르고 부드럽게 제어됨을 볼 수 있다.

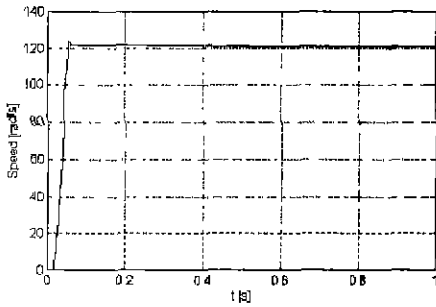


Fig. 6 Speed transient response

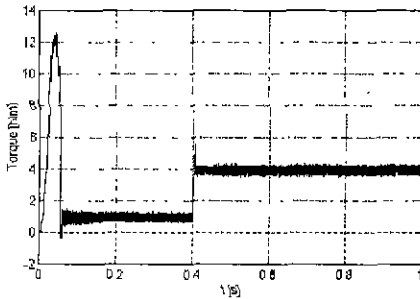


Fig. 7 Torque response

토크의 반응 역시 빠르게 나타나며, 토크 그래프는 주파수  $f_0 = 8kHz$  정도의 두터운 형상으로 완만하게 나타난다. 전류곡선 또한 단조로운 사인파 형상으로 부드럽게 나타난다. 고정자 자속과 회전자 자속은 거의 비슷한 형태로 나타나지만, 회전자 자속은 상대적으로 약간 느린 반응을 보인다.

엘리베이터가 시간 0에서 출발하는 순간 작용하는 하중에 대하여 전류와 속도, 회전자 자속의 반응 값은  $t = 0.423s$ 에서 안정화된다.

#### 5. 결론

슬립주파수는 유도전동기의 회전자계를 회전자가 토크를 발생시키기 위해 자속을 끌어냄으로써 발생하는 것이므로 슬립량은 전동기 회로정수와 직접적인 관계가 있으며, 토크제어는 슬립주파수에 의함을 알 수 있다.

설정된 전동기 계수의 오차가 없는 경우 2차 자속의 과도적 진동에도 발생토크를 일정하게 유지하도록 토크신호를 직접 조정할 수 있다. 이것으로부터 최종적으로 도달해야 하는 슬립 주파수를 정확히 추종하게 되므로 엘리베이터 시스템 구성 시 벡터제어 드라이브를 사용하기 위해 설계된 전용모터를 사용할 필요 없이, 기존의 범용적 일반 유도전동기에도 전동기 계수와 관계없이 인버터 드라이브를 그대로 사용할 수 있는 장점을 얻을 수 있다. 그러므로, 벡터제어 인버터 드라이브를 사용할 경우의 단점인 비범용적 문제를 해결할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Narihiro Terazono, Yoshitaka Matsukura, "Erebetaa Haitecku - Sekai Saikousokudo eno Chousen", Ohmsha, 1994.
2. Nobuyoshi Mutho, Naoto Ohnuma, Akihiro Omiya, Masahiro Konya, "A motor Driving Controller Suitable for Elevators". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No.6, pp 1123-1133, November 1998.
3. D W Novotny, T. A Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford University Press, 1997.
4. Y. S Lai, "New Random Technique of Inverter Control for Common Mode Voltage Reduction of Inverter-Fed Induction Motor Drives". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, pp.1139-1146, December 1999.
5. Y. S Lai, "Sensorless Speed Vector-controlled Induction Motor Drives Using New Random Technique For Inverter Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, pp 1147-1154, December 1999.