

유도전동기 벡터제어에서 퍼지제어기에 의한 시정수 보상

차득근*, 박재성*, 박건태

동의대학교 전기공학과, 삼삼제어시스템

Compensation of the Rotor Time Constant using Fuzzy Controller in Induction Motor Vector Control

Duck-Gun Cha*, Jae-Sung Park*, Gun-Tae Park

Dept. of Electrical engineering, Dong Eui University*, Sam-Sam Control System

ABSTRACT

The vector control system of an induction motor is the high performance drive system to achieve the instantaneous torque control. The vector control system is greatly divided into the direct control, and the indirect control that the most widely is used, The indirect vector control needs the rotor time constant, which changes widely according to the temperature, frequency, and current amplitude. The incorrect time constant leads to the saturation of magnetic flux or under-excitation phenomena. As a result, that deteriorate the control performance.

Therefore, in this paper, the effect of time constant variation is investigated and its on-line tuning algorithm is proposed. The time constant using the torque angles was calculated and that of the validity of algorithm proposed was proved through the computer simulation and the experiment.

1. 서 론

유도전동기의 벡터제어는 순시 토크 제어를 위한 고성능 구동 시스템이다. 벡터제어에는 직접 벡터제어와 간접 벡터제어 방법이 있는데, 주로 간접 벡터제어를 많이 사용한다. 간접 벡터제어에서는 회전자의 시정수 값을 필요로 하고, 이 시정수 값은 온도와 주파수, 그리고 전류에 따라 변화하게 된다. 만약 전동기 회전자의 시정수 값이 정확하지 않다면 자속의 포화 및 부족 여자현상을 가져오고 그 결과 제어성능을 저하시킨다.^{[1]~[5]} 따라서 본 논문에서는 회전자 시정수 변화의 영향을 분석하고, 회전자 시정수 값을 퍼지 제어기를 이용하여 적절한 값으로 보상하였다.^{[6],[7]} 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

2. 벡터제어 시스템 설계

본 논문에서는 회전자 자속을 기준으로 하여 벡터제어를 하였고, 토크는 다음 식으로 정해진다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_2} (i_{1T}\psi_{2M} - i_{1M}\psi_{2T}) \quad (1)$$

$\psi_{2T}=0$ 과 $\psi_{2M}=\psi_2$ 를 대입하면 유도전동기의 발생 토크 수식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_2} i_{1M}\psi_2 \quad (2)$$

따라서 위 식에서 알 수 있는 바와 같이 회전자 자속과 고정자 전류로 3상 농형 유도전동기를 직류 전동기처럼 토크를 제어할 수 있다.

3. 퍼지 제어기를 이용한 시정수 보상

3.1 회전자 시정수 변화의 영향

자속각은 식 (3)에서 보는 것처럼 슬립주파수와 회전자 각속도의 함수로 되어 있다.

$$\theta_e = \int (\omega_r + w_{sl}) dt \quad (3)$$

여기서, ω_r 은 전동기 회전자의 속도로서, 전동기에 속도검출용 광학식 엔코더를 설치함으로써 비교적 정확하게 전동기의 회전자 속도를 검출할 수 있다. 슬립주파수 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{sl} = \frac{M}{\phi_r} \left(\frac{r_2}{L_2} \right) i_{1T} = \frac{M}{\phi_r} \frac{1}{T_r} i_{1T} = \frac{M}{\phi_r} T_r^{-1} i_{1T} \quad (4)$$

위 식에서 알 수 있듯이 슬립주파수는 유도전동기 회전자 시정수에 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서 전동기 회전자 계수의 변화는 슬립각속도 값을 변동시켜 자속각이 실제와 달라지게 된다. 따라서 간접 벡터제어시 자속의 위치를 추정하는 것은 슬립각을 정확히 추정하는 문제로 귀결되며, 자속의 위치를 구함에 있어서 유도전동기의 계수들, 특히 회전자 시정수를 정확히 알고 있어야 한다.

3.2 회전자 시정수의 온라인 추정

벡터제어에서 계산되어진 값은 직류값인 반면 실제

전동기는 교류 전동기이므로 정지 좌표계(교류값)에서 동기 좌표계(직류값)로의 좌표변환을 필요로 한다.

벡터제어 시스템이 2차 시정수의 영향을 받는 이유는 제어기내에서는 모든 양들을 동기 좌표계로 계산하고, 제어대상인 전동기는 정지 좌표계를 기초로 하고 있기 때문이다. 따라서 전동기 시정수를 보상하기 위해 정지 좌표계와 동기 좌표계에서의 토오크각을 추정하고 이 두 개의 값을 비교하여 값이 다를 경우 보상을 하는 방법을 도입하였다.

토오크각은 그림 1과 같이 고정자 전류와 회전자 자속사이의 각으로 부하에 따라 그 크기가 변하는 값이며, 이를 동기 좌표계로 나타내면 식 (5)와 같다.

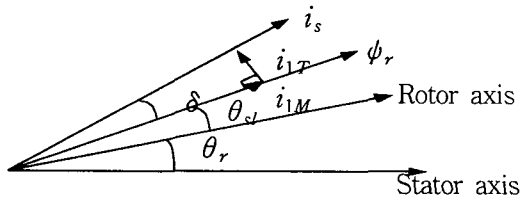


그림 1 전류 벡터도
Fig. 1 Diagram of the current vector

$$\delta^e = \tan^{-1}\left(\frac{i_{qs}}{i_{ds}}\right) = \tan^{-1}(\omega_{sl} \cdot T_r) \quad (5)$$

정지 좌표계에서의 토오크각을 정의하면 식 (6)과 같다.

$$\delta_s = \tan^{-1}\left(\frac{i_{1T}}{i_{1M}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\psi_{2\alpha}i_{1\beta} - \psi_{2\beta}i_{1\alpha}}{\psi_{2\alpha}i_{1\alpha} + \psi_{2\beta}i_{1\beta}}\right) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 이용하여 동기 좌표계에서의 토오크각과 정지 좌표계에서의 토오크각을 구할 수 있다. 만약 전동기의 파라미터 변동으로 슬립주파수가 변하게 되고, 결과적으로 자속각을 잘못 계산한다면, 정지 좌표계의 토오크각과 동기 좌표계의 토오크각이 다르게 된다. 따라서 달라진 토오크각을 추정하여 슬립 주파수의 회전자 시정수 값을 보상함으로써 전동기의 동특성을 개선시킬 수 있다.

3.3 퍼지 제어기의 적용

본 논문에서는 고속의 퍼지 알고리즘을 구현하고자 멤버십 함수를 간단히 하여 구성하였다. 그리고 Mamdani 방식을 이용하여 퍼지 추론하였고, 무게 중심법으로 비 퍼지화 하였다. 표 1은 퍼지 제어규칙을 나타낸다.

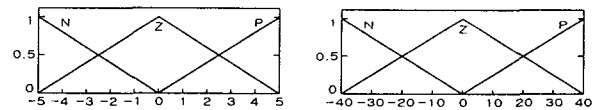
제어규칙에서 알 수 있듯이 입력오차가 음이고 오차 변화량이 음일 경우 제어값은 크게 되고, 또한 입력오차가 음이고 오차변화량이 양이면 제어값은 작아지도록 퍼지 규칙을 만들었다. 아래 그림 2는 퍼지 제어기의 오차 및 오차변화량, 퍼지 제어기 출력의 멤버십 함수를 보여준다.

그리고 본 논문에서 제안한 시정수 보상기를 갖는 벡터제어 전체 구성도는 그림 3과 같다.

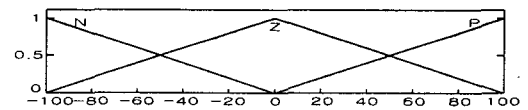
표 1 퍼지 규칙
Table 1 Fuzzy rule

$e \backslash \Delta e$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

e : 오차
 Δe : 오차 변화량
P : Positive
N : Negative
Z : Zero



(a) Membership function of error (b) Membership function of a error variation



(c) Membership function of output

그림 2 오차, 오차 변화량, 출력 멤버십 함수
Fig. 2 Membership function of Error, Variation of Error, output

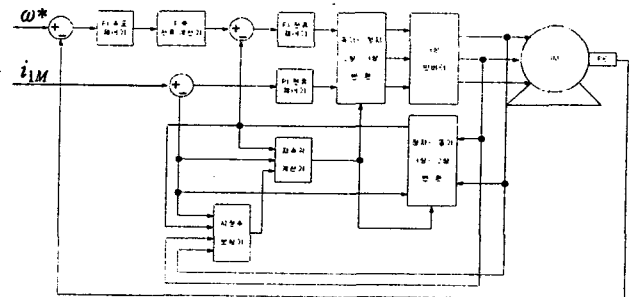


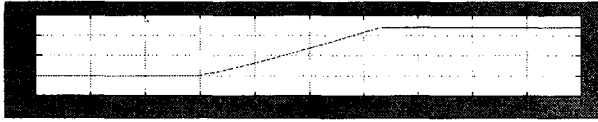
그림 3 시정수 보상기를 갖는 간접 벡터제어 구성도
Fig. 3 Indirect vector control configuration diagram with a time constant compensator

4. 시뮬레이션

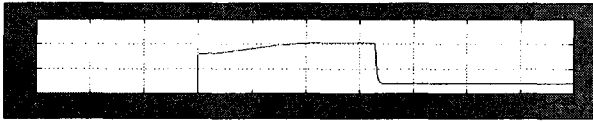
본 논문의 알고리즘의 타당성을 검증하고자 MATLAB/SIMULINK를^{[8],[9]} 사용하여 시뮬레이션을 구현하였다. 시뮬레이션에서 LabVolt사의 175[W] 3상 유도전동기를 사용하였다.

회전자 시정수 ($T_r = r_2/L_2$) 변화에 따른 속도 및 토오크의 영향을 알아보기 위하여 전동기의 회전자 저항(r_2)와 제어기의 회전자 저항(r_2')가 같은 경우, ($r_2' = 4.125[\Omega]$), 50[%]인 경우($r_2' = 2.063[\Omega]$), 150[%]인 경우($r_2' = 6.188[\Omega]$)를 각각 시뮬레이션 하였다. 지령 속도는 1200[rpm]이고 부하 토오크는 0.2[Nm]이다. 그림 4는 $r_2 = r_2'$ 인 경우이므로 원하는 속도 및 토오크 응답특성을 보인다. 그림 5는 $r_2' = 0.5r_2$ 인 경우로

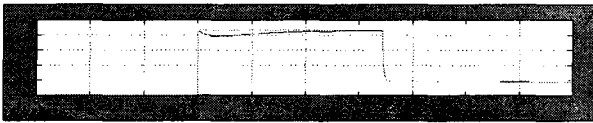
과다한 자속의 발생으로 과도상태에서 과다한 토오크가 발생하게 된다. 그림 6은 $r_2' = 1.5r_2$ 인 경우로 자속이 충분히 발생하지 못하여 최대 토오크가 작아지며, 속도 응답도 지연된다.



(a) Speed waveform of a step response



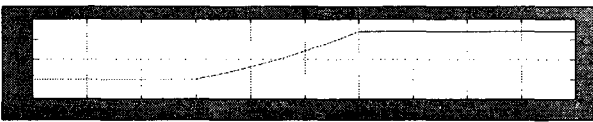
(b) Torque waveform of a step response



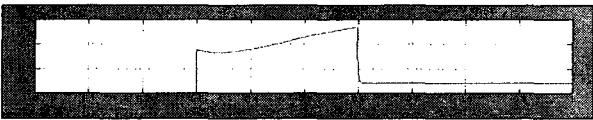
(c) Torque angle in stationary frame

그림 4 $r_2' = r_2$ 인 경우 (지령속도=1200[rpm], 부하=0.2[Nm])

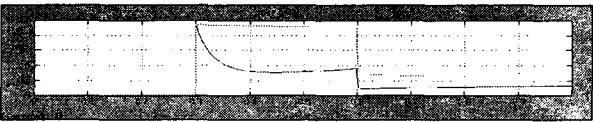
Fig. 4 The case of $r_2' = r_2$ (Speed ref=1200[rpm], Load=0.2[Nm])



(a) Speed waveform of a step response



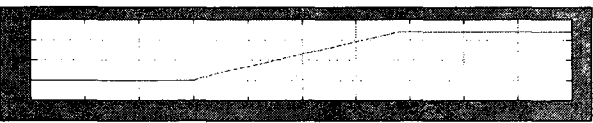
(b) Torque waveform of a step response



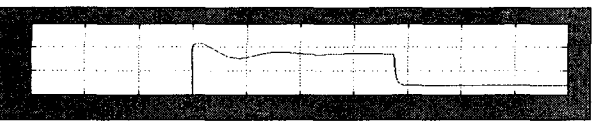
(c) Torque angle in stationary frame

그림 5 $r_2' = 0.5r_2$ 인 경우(지령속도=1200[rpm], 부하=0.2[Nm])

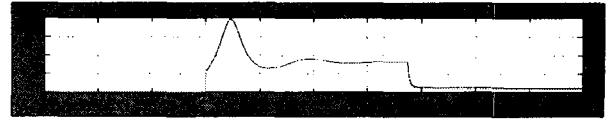
Fig. 5 The case of $r_2' = 0.5r_2$ (Speed ref=1200[rpm], Load=0.2[Nm])



(a) Speed waveform of a step response



(b) Torque waveform of a step response



(c) Torque Angle in stationary frame

그림 6 $r_2' = 1.5r_2$ 인 경우 (지령속도=1200[rpm], Load=0.2[Nm])

Fig. 6 The case of $r_2' = 1.5r_2$ (Speed ref=1200[rpm], Load=0.2[Nm])

그림 7과 8은 회전자 시정수를 추정하는 경우, 제어기 회전자 저항의 초기 값이 잘못 설정되어 있는 경우를 가정하고(제어기의 회전자 저항이 50%인 경우와 150%인 경우), 각각의 경우에 회전자 시정수를 퍼지 제어를 이용하여 보상할 때 정지 좌표계의 토오크각과 동기 좌표계의 토오크각이 같아지고 있음을 보여주고 있다. 이때 회전자 시정수 보상은 0.8[s] 이후부터 시작하였다.

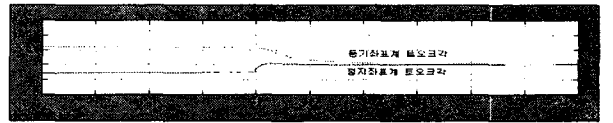


그림 7 $r_2' = 0.5r_2$ 인 경우 회전자 시정수 보상

Fig. 7 Compensation of Rotor Time Constant

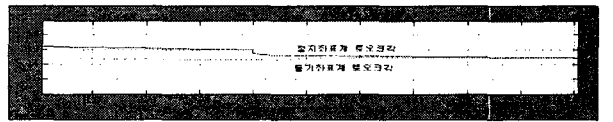


그림 8 $r_2' = 1.5r_2$ 인 경우 회전자 시정수 보상

Fig. 8 Compensation of Rotor Time Constant

5. 실험 및 결과고찰

5.1 실험장치 구성

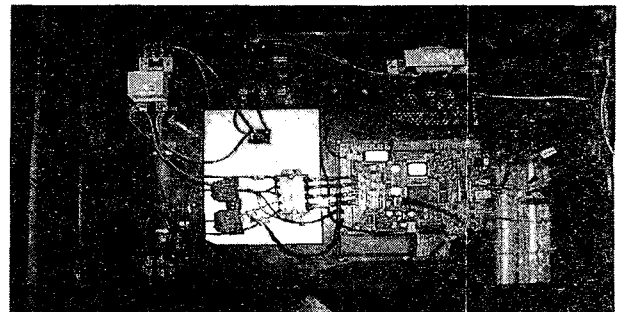


사진 1 실험장치 외관

Photo 1 External of experimental apparatus

5.2 실험결과 파형 및 고찰

그림 9는 전동기의 회전자 저항(r_2)와 제어기의 회전자 저항(r_2')가 같을 때의 실험결과 파형이다. 지령속도는 1200[rpm]이고 부하 토오크는 0.2[Nm]이다. 회전자 시정수의 값이 정상적인 경우 정지 좌표계에서의 토오크각과 동기 좌표계에서의 토오크각이 같음을 알 수 있다

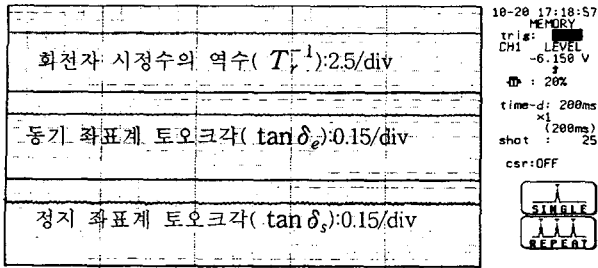


그림 9 토오크각 및 시정수 역수 파형 : $r_2' = r_2$
 Fig. 9 Waveform of a torque angle and inverse time constant : $r_2' = r_2$

그림 10은 제어기의 회전자 저항이 전동기의 50[%]로 설정되어 있는 경우이며, 시정수 보상은 전동기가 기동하고 나서 6초 후부터 시작하였다. 그림 12에서 나타낸 바와 같이 제어기 회전자 시정수의 역수 T_r^{-1} 값은 초기에 2.5의 값에 있다가 제어가 시작된 후 250[ms]안에 정상적인 값인 5.6에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 제어기의 회전자 저항이 전동기의 150[%]로 설정되어 있는 경우이며, 시정수 보상은 전동기가 기동하고 나서 6초 후부터 시작하였다. 그림 13에서 알 수 있듯이 제어기 회전자 시정수의 역수 T_r^{-1} 값은 초기에 9.32의 값에 있다가 제어가 시작된 후 100[ms]안에 정상적인 값인 5.6에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

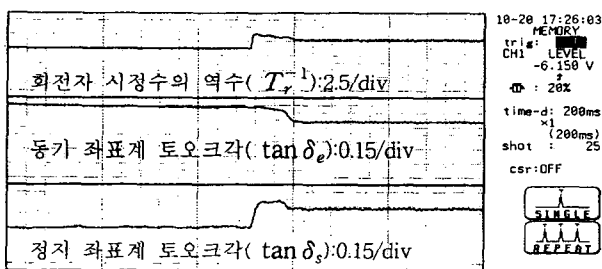


그림 10 토오크각 및 시정수 역수 파형 : $r_2' = 0.5r_2$
 Fig. 10 Waveform of a torque angle and inverse time constant : $r_2' = 0.5r_2$

위의 실험결과를 통하여 회전자 시정수의 값이 정상적일 경우에는 정지 좌표계의 토오크각과 동기 좌표계의 토오크각이 일치함을 알 수 있었다. 그리고 임의의 제어기 회전자 저항의 값을 변동하였을 경우 퍼지 제어를 이용하여 보상하였다. 그 결과 회전자 시정수 값은 수백[ms]안에 보상되어 정상적인 값으로 되고, 정지 좌표계의 토오크각 및 동기 좌표계의 토오크각은 같아짐을 알 수 있었다.

6. 결 론

유도전동기 벡터제어에 있어서 시정수 값은 노화

및 주변환경에 따라 조금씩 변하게되어 벡터제어의 속도 및 토오크의 동특성을 나쁘게 하는 원인이 된다.

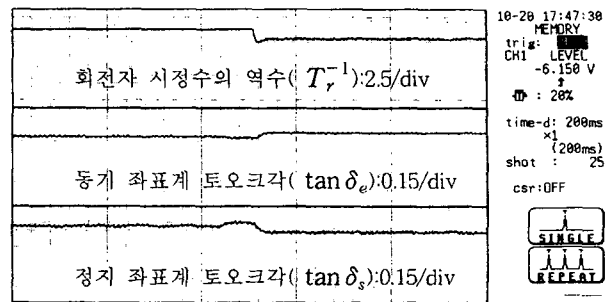


그림 11 토오크각 및 시정수 역수 파형 : $r_2' = 1.5r_2$
 Fig. 11 Waveform of a torque angle and inverse time constant : $r_2' = 1.5r_2$

따라서 본 논문에서는 유도전동기 회전자 시정수의 변동에 대한 제어특성을 고찰하였으며, 토오크각을 이용하여 정지 좌표계의 토오크각과 동기 좌표계의 토오크각을 온라인 추정하였다. 그리고 10[kHz]로 동작하는 전류 루프 안에 회전자 시정수 추정 알고리즘과 퍼지 제어를 추가하여 회전자 시정수 값이 보상됨을 알 수 있었다.

이 논문은 영남 전동기제어 신기술 연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었습.

참 고 문 헌

- [1] 박건태, 김재형, 차득근, 신병철, 강경호, 정용용, "고정자 자속 기준 3상 유도전동기 벡터제어," 전력전자학회 하계 학술대회 논문집, pp. 181-185, 2000.
- [2] M. Akiyama, K. Kobayashi, I. Miki, and M. A El-Sharkawi, "Auto-Tuning Method for Vector Controlled Induction Motor Drives," IPEC-Yokohama Vol. 95, pp. 789-794, 1995.
- [3] L.J. Garces, "Parameter Adaption for Speed-Controlled Static AC Drive with a Squirrel-Cage Induction Motor," IEEE, Vol. IA-16, pp. 173-178, 1980.
- [4] S.N. Vukosavic and M. R. Stojic, "On-line Tuning of the Rotor Time Constant for Vector-Controlled Induction Motor in Position Control Applications," IEEE, Vol. 40, pp. 130-138, 1993.
- [5] S.K Sul, "A Novel Technique of Rotor Resistance Estimation Considering Variation of Mutual Inductance," IEEE, Vol. 25, pp. 578-587, 1989.
- [6] 오성권, "퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램," 技多利, pp. 11-90, 1999.
- [7] 관야도부, 박민용, 최항식, "퍼지 제어 시스템," 대영사, pp.54-114, 1990.
- [8] C.M. Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/SIMULINK," Prentice Hall PTR, pp. 167-258, 1997.
- [9] 이현엽, 문경일, "MATLAB을 이용한 퍼지-뉴로," 야진, pp.445-454, 1999.