



전기자동차용 유도전동기의 고성능 제어를 위한 퍼지제어

Fuzzy Control for High Performance of Induction Motor Using Electric Vehicles

정 동 화*

Dong-Hwa Chung

(1998년 7월 30일 접수, 1999년 3월 2일 채택)

ABSTRACT

This paper proposes the application of fuzzy control for high performance control of induction motor using electric vehicles. A fuzzy controller converts a set of linguistic rules based on expert knowledge into a automatic control strategy. Such controllers have often been found superior to conventional controllers especially when information being processed is inexact and uncertain.

A system with fast torque response is very beneficial in applications where direct self control (DSC) is highly desirable. The response of DSC is slower during startup and during change in command torque. Fuzzy control is used for implementation of DSC to improve its slow response.

Simulation implementation of the fuzzy logic controller was carried out to verify the behavior of the controller. The simulation results with fuzzy control are compared with those of the conventional DSC. The starting flux and torque response and the responses to the step changes in command torque with fuzzy implementation show a considerable improvement over the conventional control. The steady state responses in both the cases are the same.

1. 서 론

최근 자동차 배기가스로 인한 대기오염이 심각해지고 있으며 종래의 디젤 또는 가솔린 등의

유류를 사용하고 있는 자동차를 대체할 무공해 전기자동차에 대한 개발의 필요성이 강력하게 요구되고 있다. 환경문제 및 산업안전은 물론이고 에너지 사용의 다양화라는 관점에서 전기자동차

* 순천대학교 공과대학 전기제어공학과

차는 미래의 매우 비중 높은 교통수단으로 사용될 전망이다. 따라서 우리나라 산업의 중요한 위치를 차지하고 있는 자동차 산업이 세계적인 추세에 부응하여 더욱 발전하려면 전기자동차의 개발에 한층 박차를 가해야 할 것이다.

유도전동기의 벡터제어는 전기자동차와 같은 고속 토크제어가 요구되는 적용분야에서 그 진가가 유감없이 발휘되어 산업계에서는 한층 더 매력을 느끼고 있다. 토크변화에 고속으로 응답하는 시스템에서는 토크의 직접제어가 요구되어 매우 유용하게 사용되어 왔다. 벡터제어가 유도전동기의 토크와 자속을 제어하는데 효율적이지만 유도전동기의 파라미터와 속도에 매우 많은 영향을 받는다¹⁾. 고정자 DSC(Direct Self Control)는 제어방법에서 속도정보를 사용하지 않고 단지 고정자 저항만을 사용한다²⁾.

DSC에서는 토크와 고정자 자속은 이 값에 의해 적절하게 변화하는 스위칭상태를 선정하고 공간벡터를 구성하여 토크와 자속의 지령치에 일치하도록 조절한다. 스위칭상태는 전기적 토크의 오차, 고정자 자속의 오차 및 고정자 자속 벡터의 위치에 따라 선정된다. 기동 또는 지령 토크 및 지령 고정자 자속의 스텝변화가 발생할 경우 큰 오차가 나타나며 이 경우에 선정하는 스위칭상태는 정상동작에서 나타나는 양호한 제어에서와 같은 방법으로 다루었다²⁾. 이는 기동 또는 지령 토크 및 지령 고정자 자속의 스텝변화가 발생할 경우에 응답특성을 매우 저하시키는 결과를 야기시킨다. 스위칭상태를 선정할 경우 토크 및 자속 오차가 존재하는 범위를 고려할 수 있다면 시스템 응답의 개선이 가능하다²⁾. 각 스위칭상태는 $\pi/6$ (rad) 밴드폭내에 자속위치를 정의하고 이 밴드폭내에서 자속의 위치에 따라 스위칭상태를 선정하여 시스템 응답을 개선시킬 수 있다.

제어기 형태는 상태의 값에 의해 조절되는 제어규칙을 사용하며 입력은 퍼지논리 제어기이다. 퍼지논리 제어기는 자동제어 방법³⁾에서 전문가 지식에 의한 언어규칙의 집합으로 변환한다. 이러한 제어기는 특히 부정확하고 불확실한 프로세서의 정보가 있을 경우에 종래의 제어기보다 우수하며 국내에서도 다양하게 연구가 되

고 있는 실정이다^{4~6)}.

본 논문에서는 전기자동차용 유도전동기의 고성능 제어를 위해 DSC를 개선하여 퍼지제어를 제시하고 종래의 DSC 와 비교하여 얻은 고성능 및 고속응답의 결과의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 전기자동차의 제어 시스템

Fig. 1은 전기자동차의 추진제어 시스템의 구성도를 나타내며 ECU(Electronic Control System), 인버터, 유도전동기, 구동용 배터리, 전인 배터리, 결합 박스, DC-DC 컨버터 및 배터리 충전지 등으로 구성되어 있다⁷⁾.

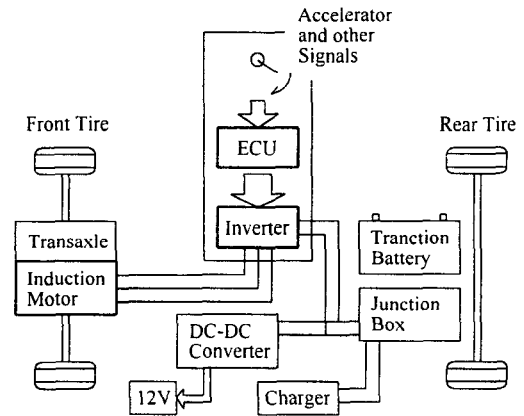


Fig. 1 Schematic of electric vehicle propulsion control system

본 논문에서는 전기자동차를 구동하기 위하여 인버터로 제어되는 유도전동기의 고성능 제어를 위한 퍼지제어에 목적을 두고 있다. 유도전동기, 인버터 및 제어기에 중점을 두고 효율이 양호하고 안정성이 있으며 고속 응답을 얻을 수 있는 퍼지제어기를 제시하고자 한다.

3. DSC를 수정한 퍼지이론

유도전동기 드라이브의 벡터제어는 전기차와 같은 고속 토크제어가 요구되는 경우에 유도전동기의 사용을 가능하게 하였다. 완전한 FO(FI-

eld, Orientation) 제어에서 FO 유도전동기의 비간섭 특성은 전동기의 파라미터 변동에 크게 영향을 받는다. 종래에는 파라미터의 변동문제를 해결하기 위하여 DSC를 많이 사용했으며 Fig. 2에 종래의 DSC를 나타낸다^{2,8)}.

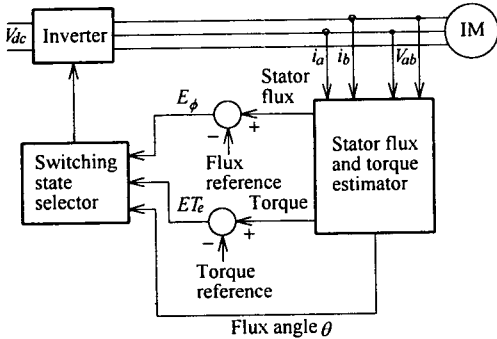


Fig. 2 Conventional direct self controller

고정자 자속과 토크 추종자의 상세한 블록도는 Fig. 3에 나타내며 고정자 DSC에서 자속위치에 따른 토크와 자속에서의 오차는 직접 스위칭 상태를 결정하는데 사용한다. 종래의 DSC에서는 매우 큰 오차와 상대적으로 매우 작은 오차를 구별하는 방법이 없으므로 기동 또는 지령토크

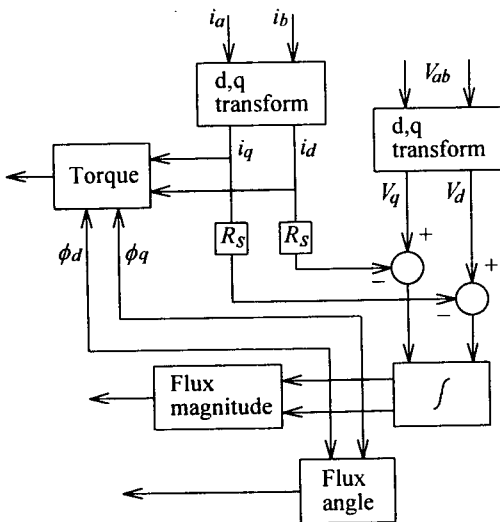


Fig. 3 Stator flux and electric torque estimator

크와 지령자속에서의 스텝변화동안 스위칭상태는 큰 오차를 발생한다. 이는 시스템의 응답을 둔감하게 하는 원인이 된다.

시스템에서 사용한 상태를 토크 오차, 자속 오차 및 자속위치의 범위에 따라 선정할 수 있다면 기동 또는 지령토크와 지령자속의 변화에 대한 시스템의 응답을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 유도전동기의 고정자 DSC를 위한 퍼지 제어기를 제시하며 Fig. 4는 DSC의 특성개선을 위해 퍼지논리를 포함시켜 수정한 퍼지 제어기의 블록도를 나타낸다.

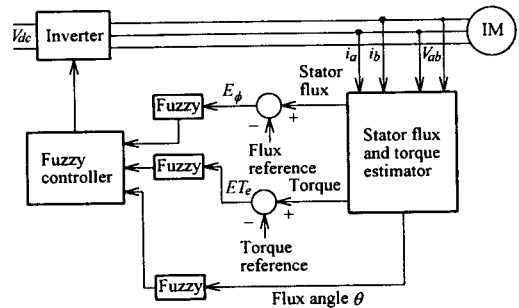


Fig. 4 Fuzzy controller for DSC of IM

4. 퍼지 제어기

4.1 퍼지상태와 퍼지변수

퍼지 제어기는 일정 토크와 자속제어를 달성하기 위하여 3개의 퍼지상태 변수와 1개의 제어 변수로서 설계한다. 각 변수는 퍼지요소로 분할하며 각 변수에서 퍼지요소의 수는 규칙의 최소수에 대한 최대 제어로 선정한다. 첫번째의 변수는 지령 고정자 자속 ϕ_s^* 와 추정 고정자 자속 ϕ_s 사이의 오차이며 다음과 같다.

$$E_\phi = \phi_s^* - |\phi_s| \dots\dots\dots (1)$$

실제 고정자 자속은 고정 기준축에서 전압과 전류 정보로부터 계산할 수 있다⁹⁾.

$$\phi_{qs}/\omega_b = \int (V_{qs} - i_{qs}R_s) dt \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_{ds}/\omega_b = \int (V_{ds} - i_{ds}R_s) dt \dots\dots\dots (3)$$

$$|\phi_s| = \sqrt{(\phi_{qs}^2 + \phi_{ds}^2)} \dots\dots\dots (4)$$

자속오차의 퍼지변수에 대한 전체요소는 3개의 중첩된 퍼지집합으로 나누어지며 이는 정(+) 자속오차(PE_φ), 영 자속오차(ZE_φ) 및 부(-) 자속오차(NE_φ)이다. 소속분포의 등급은 삼각분포를 사용하며 Fig. 5(a)에 나타낸다.

두 번째의 퍼지상태 변수는 지령 전기적 토크 T_e^{*}와 추정 전기적 토크 T_e 사이의 오차이며 다음과 같다.

$$ET_e = T_e^* - T_e \dots\dots\dots (5)$$

전기적 토크는 자속과 전류에 의해 추정한다.

$$T_e = (i_{qs} \Phi_{ds} - i_{ds} \Phi_{qs}) P / 4 \omega_b \dots\dots\dots (6)$$

토크변동을 작게 하기위해 토크오차의 전체 요소는 5개의 중첩된 퍼지집합으로 분할하며 이는 정의 큰 오차(PLET_e), 부의 작은 오차(NS-ET_e), 영 오차(ZET_e), 부의 작은 오차(NSET_e) 및 부의 큰 오차(NLET_e)이다. 소속분포는 Fig. 5(b)에 나타낸다.

세 번째의 퍼지상태 변수는 고정자 자속과 기준축 사이의 각이며 다음과 같다.

$$\theta = -\tan^{-1}(\Phi_{ds} / \Phi_{qs}) \dots\dots\dots (7)$$

이러한 퍼지변수 각도의 전체요소는 12개 퍼지집합(θ₁ - θ₁₂)으로 분할하며 소속분포는 Fig. 5(c)에 나타낸다. 제어변수는 인버터의 스위칭상태(n)이며 6 스텝 인버터에서는 7개의 다른 스위칭상태가 가능하다. 스위칭상태는 보통(crisp)으로 되어 있으므로 퍼지 소속분포가 요구되지 않는다.

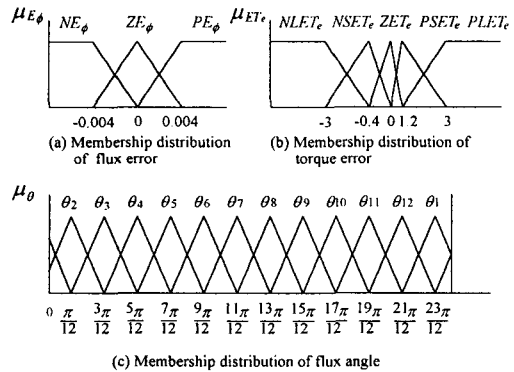


Fig. 5 Membership distribution of fuzzy variables for fuzzy controller

4.2 공간벡터 PWM 방식^{10,11)}

인버터의 스위칭상태는 공간벡터 PWM을 이용하여 자속과 토크의 오차에 의해 자속의 위치각이 결정되면 공간벡터를 선정하게 된다. Fig. 6은 인버터와 유도전동기의 시스템을 나타내며 Fig. 7은 인버터에서 출력 가능한 전압 상태를 나타낸다. 3상 인버터는 모두 6개의 스위칭소자로 구성되며, 외부의 3상회로에 전압을 인가할 수 있는 방법으로는 6개의 유효전압(V₁-V₆)과 2개의 영전압(V₀, V₇)이 있다.

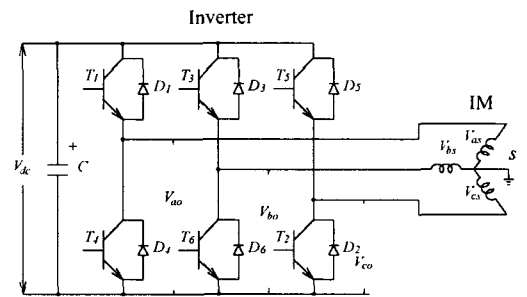


Fig. 6 System of inverter and IM

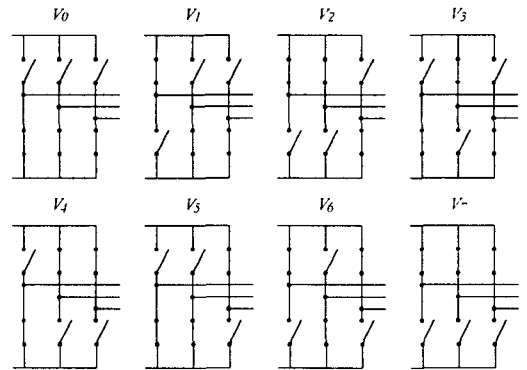


Fig. 7 Available output voltage state of the inverter

영전압이란 인버터의 스위칭소자 중에서 위쪽(V₀) 혹은 아래쪽(V₇) 소자들이 모두 도통되는 상황으로 어느 경우에서든 유도전동기의 단자가 한 포인트에서 단락되는 효과를 나타낸다. 즉, 영전압이 유도전동기에 인가된다고 할 수 있으며 이러한 전압벡터를 영벡터라고 한다. 영벡터를 제외한 6개의 벡터는 서로 각기 다른 유

효전압을 유도전동기에 공급할 수 있는 벡터로써 유효벡터라고 한다. 이 6개의 전압이 차례대로 유도전동기에 인가되면 시간적으로 한주기, 즉 360° 회전하는 전압이 유도전동기에 인가되는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 관점에서 전압을 벡터공간상에 배치하면 Fig. 8과 같이 60°의 등간격을 갖는 벡터로써 표시될 수 있으며 고정자 전압벡터는 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{s(k)} = \begin{cases} \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(k-1)2\pi/3} & k=1, 2, \dots, 6 \\ 0 & k=0, 7 \end{cases} \quad (8)$$

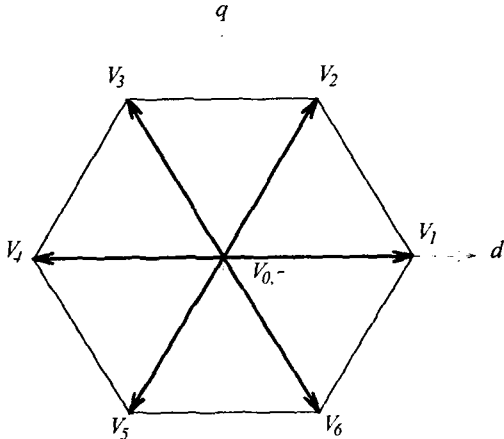


Fig. 8 Space voltage vector diagram

4.3 DSC를 위한 퍼지규칙

각 제어규칙은 상태변수 E_θ , ET_e , θ 와 제어변수(n)로 표현할 수 있다. i번째 규칙 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

R_i : if E_θ is A_i , ET_e is B_i and θ is C_i then n is N_i

여기서, A_i , B_i , C_i 및 N_i 는 퍼지요소를 나타낸다.

제어규칙은 Fig. 9에 나타낸 DSC를 위한 벡터도를 사용하여 구성하며 I_r 는 토크전류의 성분이다. 이 그림에서 상태 5, 6과 1은 자속을 증가시키고 상태 2, 3과 4는 자속을 감소시킨다.

이와 유사하게 상태 6, 1과 2는 토크를 증가시키고 상태 3, 4와 5는 토크를 감소시킨다. 자속을 크게 증가시키고 토크를 작게 증가시키기 위하여 상태 6을 선정하고 자속을 작게 증가시키고 토크를 크게 증가시키기 위하여 상태 1을 선정한다. 자속을 작게 감소시키고 토크를 작게 증가시키기 위하여 상태 2를 선정한다. 자속을 크게 감소시키고 토크를 작게 감소시키기 위하여 상태 3을 선정한다. 자속을 작게 감소시키고 토크를 크게 감소시키기 위하여 상태 4를 선정한다. 자속을 작게 증가시키고 토크를 크게 감소시키기 위하여 상태 5를 선정한다. 자속을 일정하게 하고 토크를 작게 감소시키기 위하여 상태 0을 선정한다.

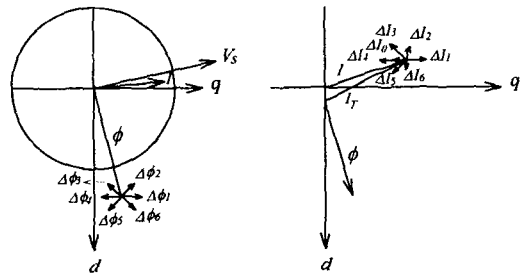


Fig. 9 Vector diagram used for knowledge base

자속벡터의 위치가 변화할 경우에 스위칭상태의 선정이 변화된다. 규칙의 전체 수는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 180개이다. 이 그림에서 각 셀은 요구되는 각에 대해 최대의 스위칭상태를 나타낸다.

4.4 퍼지추론

추론방법은 기초적이고 간단하며 퍼지구성함수로서 최소 동작규칙으로 부터 개발되었다. A, B, C 및 N의 소속함수는 각각 μ_A , μ_B , μ_C 및 μ_N 으로 나타내며 i번째 규칙의 점호길이 α_i 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha_i = \min [\mu_{A_i}(E_\theta), \mu_{B_i}(ET_e), \mu_{C_i}(\theta)] \quad (9)$$

퍼지합축 함수로서 Mamdani의 최소동작을 사용한 퍼지추론^{12,13)}에 의해 i번째 규칙은 제어

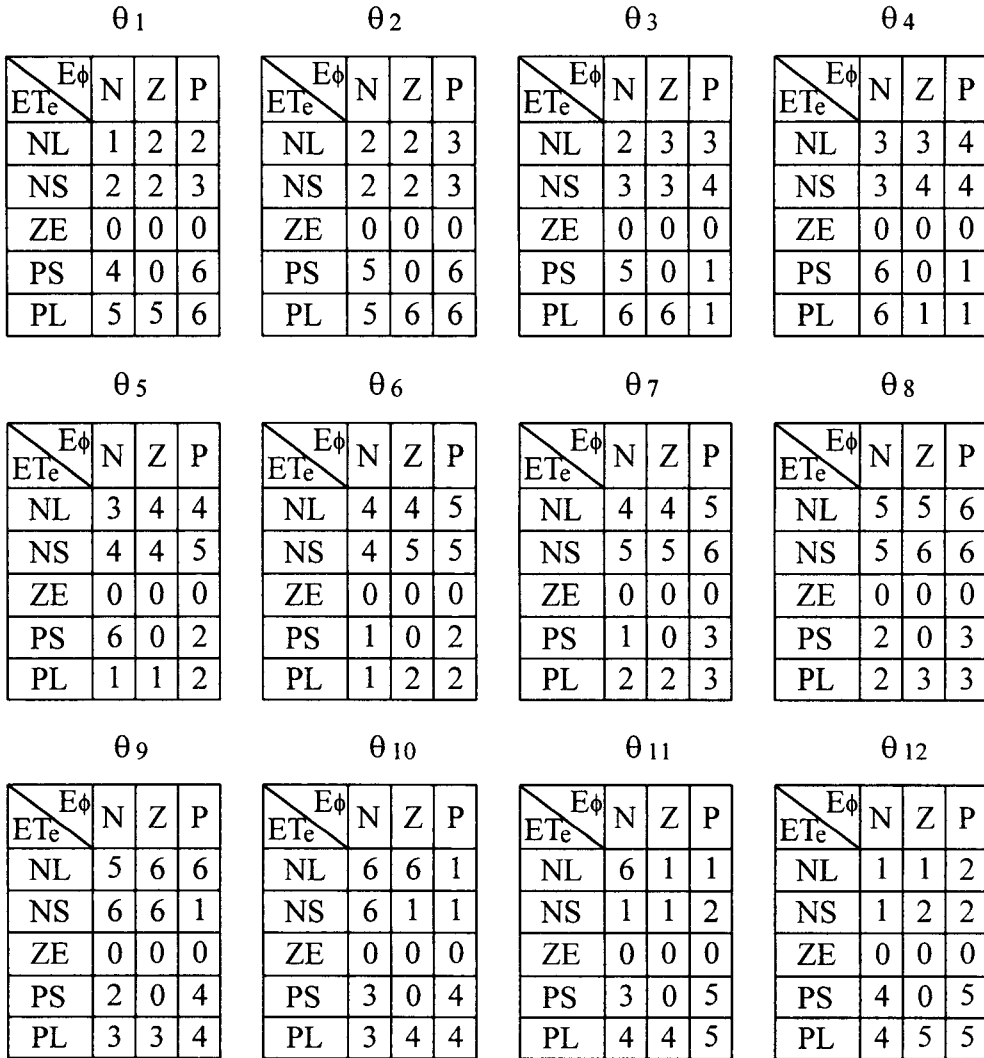


Fig. 10 Set of fuzzy rules for fuzzy control of IM

결정을 유도한다.

$$\mu_{NI}(n) = \min[\alpha_i, \mu_{Ni}(n)] \dots\dots\dots (10)$$

출력 n의 소속함수 μ_N 은 다음과 같다.

$$\mu_N(n) = \max_{i=0}^{180} [\mu_{Ni}'(n)] \dots\dots\dots (11)$$

출력이 보통이므로 최대 기준법은 비퍼지화를 위하여 사용하며 최대 확률분포를 가지는 퍼지출력의 값은 제어출력으로서 사용한다.

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 퍼지제어기의 실현을 위한 블록도는 Fig. 11과 같고 3상, 220 V, 4극인 유도전동기 드라이브 시스템의 파라미터는 Table 1과 같다.

Fig. 12는 종래의 DSC에 의한 응답특성의 결과를 나타내고 Fig. 13은 본 논문에서 제시한 퍼지 제어기에 의한 응답특성의 시뮬레이션 결과를

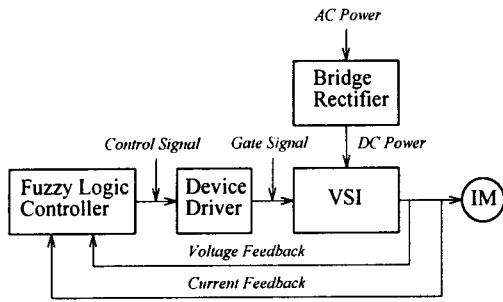


Fig. 11 Block diagram of fuzzy controller

Table 1 Parameters of IM drive system

3 Phase, 220 V, 4 Pole, 60 Hz
$R_s=0.435 \Omega, R_r=0.816 \Omega, X_s=26.884 \Omega,$
$X_r=26.884 \Omega, X_m=26.13 \Omega$

나타낸다. Fig. 12와 13에서 (a)는 지령토크를 12 N·m로 일정하게 운전하며 0.25 sec에서 지령토크를 5 N·m로 감소시켰을 경우의 파형을 나타낸다. 그림(b)는 고정자 자속, (c)는 실제속도, (d)는 고정자 전류 및 (e)는 선간전압을 나타낸다. 실제 토크와 자속은 지령 토크와 자속에 양호하게 추종하고 있으며 0.25 sec에서 토크감소에 따라 속도와 전류도 감소하는 현상이 나타나고 있다. Fig. 12의 종래의 DSC 보다 Fig. 13의 퍼지 제어기의 추종응답은 고속으로 나타나는 특성을 보이고 있다.

Fig. 14는 DSC에서 지령 스텝토크 변동에 의한 응답특성의 결과를 나타내고, Fig. 15은 본 논문에서 제시한 퍼지 제어기에 의한 응답특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 14와 15에서 (a)는 지령토크를 5 N·m로 일정하게 운전하던 중 순간적으로 0.3 sec에서 지령토크를 12 N·m로 스텝 증가시켰을 경우의 파형을 나타낸다. 그림(b)는 실제속도, (c)는 지령전류, (d)실제전류 및 (e)는 선간전압을 나타낸다. 실제 토크와 전류는 지령 토크와 전류에 양호하게 추종하고 있으며 0.3 sec에서 토크증가에 따라 속도와 전류도 증가하는 현상이 나타나고 있다. Fig. 14의 종래의 DSC 보다 Fig. 15의 퍼지 제어기의 추종응답 고속응답 특성을 나타내고 있다.

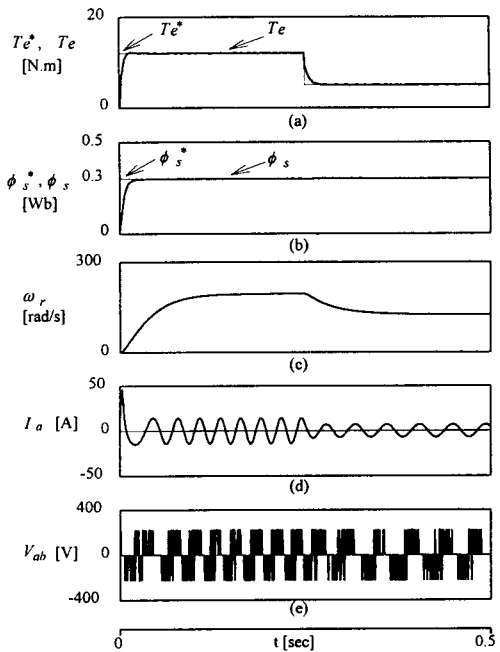


Fig. 12 Response waveform of conventional DSC with command step torque

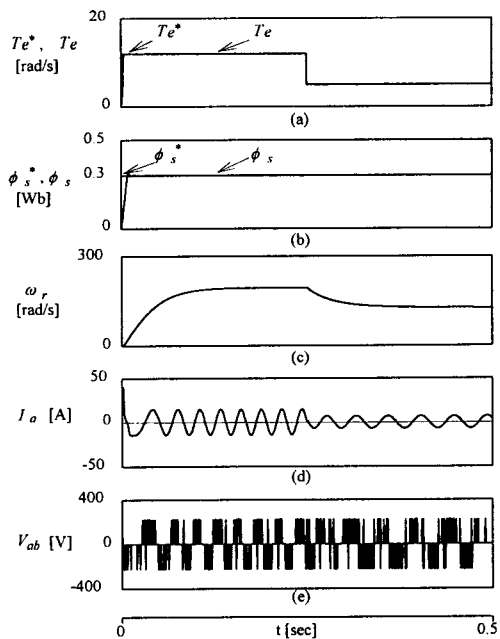


Fig. 13 Response waveform of fuzzy controller with command step torque

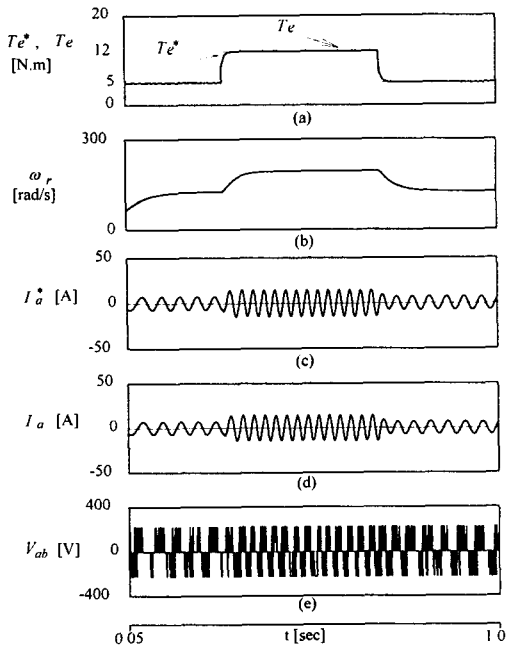


Fig. 14 Response wave of Conventional DSC with command step torque change

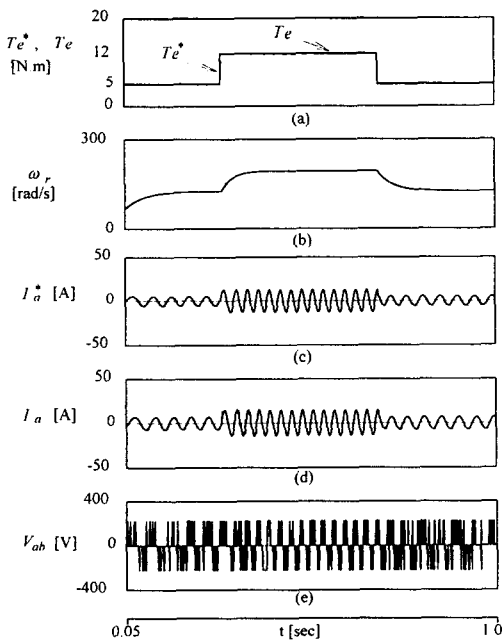


Fig. 15 Response wave of fuzzy controller with command step torque change

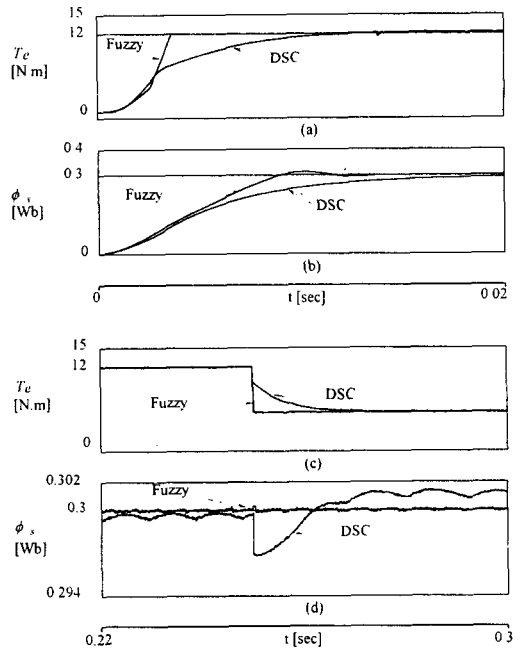


Fig. 16 Comparison of Transient response waveform

Fig. 16은 종래의 DSC와 본 논문에서 제시한 퍼지 제어기의 과도 응답특성을 비교한 것으로 그림(a)와 (b)는 유도전동기가 기동시 드라이브 시스템의 토크와 고정자 자속의 응답특성이다. 퍼지 제어기에 대한 응답이 종래의 DSC보다 매우 고속으로 나타나며, 이 결과로부터 본 논문에서 제시한 퍼지제어기의 타당성을 입증할 수 있다. Fig. 16(c)와 (d)는 유도전동기 운전중 고정자 자속의 지령은 일정하게 유지하며 지령토크를 12 N·m로 일정하게 유지하다가 0.25 sec에서 5 N·m로 스텝으로 감소시켰을 때의 시스템 응답을 나타낸다. 퍼지 제어기의 토크응답이 DSC에 비해 매우 빠르게 추종하는 특성을 나타내고 고정자 자속은 퍼지제어기에서는 거의 일정하게 나타나고 있는 반면 DSC에서는 맥동과 과도상태가 나타나고 있다.

Fig. 17은 퍼지 제어기에 의한 정상상태의 동작특성을 나타내며 그림(a)는 토크, 그림(b)는 고정자 자속, 그림(c)는 고정자 전류 및 그림(d)는 고정자 전압을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 공간벡터 제어에 의한 PWM을 사용하

여 고조파 성분이 거의 없는 양호한 특성파형을 얻을 수 있었다.

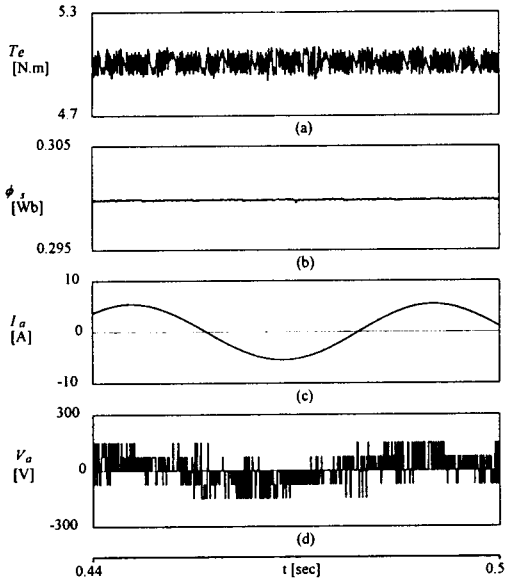


Fig. 17 Response waveform of steady state with fuzzy controller

5. 결 론

본 논문에서는 전기자동차용 유도전동기의 DSC를 위한 퍼지논리 제어기를 제시하였다. 토크와 자속루프를 위한 퍼지논리 제어기를 설계하였으며 공간벡터를 이용한 PWM 방식을 적용하여 퍼지 제어기와 종래의 DSC의 비교, 검토하였다. 퍼지 제어기는 종래의 DSC보다 빠른 추종특성을 갖는 것이 입증되었으며 구체적인 결과는 다음과 같다.

- 1) 토크와 자속루프에 퍼지제어를 적용하여 부하의란에 강인성 제어를 할 수 있었다.
- 2) 퍼지제어에서는 전동기를 기동시킬 경우에도 토크 및 자속의 응답특성이 PI 제어에서보다 고속으로 추종하는 결과를 얻었다.
- 3) 퍼지제어에서 지령토크를 스텝으로 변화할 경우에도 토크 및 자속의 응답특성이 PI 제어에서보다 빠르게 추종하는 결과를 얻을 수 있었다.

4) 퍼지제어에서 일정 토크로 정상운전중 갑자기 토크를 증가시킬 경우에도 토크의 추종상태가 PI 제어보다 매우 빠르게 나타나며, 실제전류는 지령전류에 양호하게 추종하는 특성을 확인하였다.

5) 퍼지제어와 공간벡터 PWM 방식을 적용하여 정상상태에서도 고조파성분이 거의 나타나지 않는 양호한 특성파형을 얻을 수 있었다.

본 연구결과를 기초로 하여 PMSM, BDCM, SRM 및 SynRM등 타 전동기에도 퍼지 제어기의 적용이 가능하며, 포화영향을 더욱 양호하게 개선하기 위하여 퍼지 제어기에 신경 회로망 또는 전문가 시스템을 적용하는 방안에 대한 내용이 앞으로의 연구과제이다.

참 고 문 헌

- 1) K.H. Nordin, D.W. Novotny and D.S. Zinger, "The influence of motor parameter deviation in feedforward field oriented control", IEEE Trans. on IA, Vol. IA-21, No. 4, pp. 1009~1015, 1985.
- 2) T. Habetler and D. Divan, "Control strategies for direct torque control of induction machine using space vector modulation", IEEE Trans. on IA, pp. 893~901, 1991.
- 3) C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic control-part 2", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 419~435, 1990.
- 4) C.Y. Won, S.C. Kim and B.K. Bose, "Robust position control of induction motor using fuzzy logic control", in IEEE IAS'92 Conf. Rec., pp. 472~481, 1992.
- 5) J.S. Ko, J.H. Lee and M.J. Youn, "Robust position control of BLDC motor using fuzzy logic", KIEE Trans. Vol. 40, No. 10, pp. 1037~1048, 1991.
- 6) D.H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system", KIEE Trans. Vol. 47, No. 12, pp.

- 2171~2180, 1998.
- 7) K. Obayashi, et al., "An electric vehicle propulsion control system", IEEE IAS Conf. Rec. pp. 267~271, 1997.
 - 8) I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction machine", IEEE Trans. on IA, pp. 820~827, 1986.
 - 9) B.K. Bose, "Power electronics and AC drives", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
 - 10) T.G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli and L.M. Tolbert, "Direct torque control of induction machines using space vector modulation", IEEE Trans. on IA, pp. 1045~1053, 1991.
 - 11) J.S. Kim and S.K. Sul, "A novel voltage modulation technique of the space vector PWM", IPEC'95 Yokohama Conf. Rec., pp. 742~747, 1995.
 - 12) E.H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithm for control of a simple dynamic plant", Proc. IEE, Vol. 121, pp. 1585~1588, 1974.
 - 13) E.H. Mamdani and S. Assilian, "A fuzzy logic controller for a dynamic plant", Int. J. Man-Machine Studies., Vol. 7, pp. 1~13, 1975.

본 연구는 한국과학재단지정, 순천대학교 자동차 부품 및 소재연구 개발센터의 지원에 의한 것입니다.