
퍼지제어기를 이용한 농형 유도 전동기의 직접 토크제어

한 상 수*

Direct Torque Control of Squirrel Cage Typed Induction Motor Using Fuzzy Controller

Sang-soo Han*

요 약

기동 시나 갑작스런 토크명령 변동에 빠른 토크응답 특성을 갖는 퍼지 논리 제어기를 이용한 농형 유도 전동기의 직접 토크제어 방식을 제안 하였다. 퍼지제어 알고리즘은 기존의 DSC(Direct Self Controller) 제어 원리를 기저로 하여 제안하였으며 퍼지 추론 및 비 퍼지화를 거쳐 수행된다. 유도전동기의 자속과 토크는 광범위한 속도 영역에서 비 간섭 및 우수한 동특성을 갖는 회전자 자속 기준 동특성 모델을 사용하였다. 실험결과 제시한 퍼지 제어 알고리즘은 우수한 동특성 및 적응적 특성을 갖으며 전동기 변수와 동작 조건의 변동에 민감하지 않고 강인하다.

ABSTRACT

The direct torque control method of an inverter fed squirrel cage typed induction motor using fuzzy logic controller has been proposed. This method is suitable for the traction which requires a fast torque response during the start-up and step change. The fuzzy control algorithm based upon the control principles of conventional DSC(Direct Self Controller) is developed. The fuzzy algorithm is carried out by defuzzification strategy of the fuzzy output extracted from the possibility distribution of an inferred fuzzy control rule. The flux and torque of an induction motor are estimated by the dynamic model of the rotor flux field-oriented scheme which has decoupling characteristics and excellent dynamic response over a wide speed range.

The proposed controller shows a good dynamic response. Moreover, since the fuzzy controller possesses highly adaptive capability, the performance of fuzzy controller is quite robust and insensitive to the motor parameters and change of operation conditions.

키워드

Direct Self Control, Squirrel cage type induction motor, Fuzzy Controller, rotor flux field - oriented scheme,

I. 서론

유도전동기의 벡터제어방식은 산업용로보트나 전기 기관차 등과 같이 기동이나 순간 토크 응답 변동에 대하여 빠른 토크응답 특성을 요구하는 견인구동장치(traction drives)응용분야에 많이 적용되고 있다. 유도전동기의 벡터제어방식은 Blaschke에 의해 제안된 직접제

어방식과 Hasse에 의해 제안된 간접제어방식으로 구분할 수 있다 [1],[2].

견인구동장치의 토크는 속도오차에 의하여 발생되는 것이 아니라 명령토크에 의하여 발생되기 때문에 고정자자속을 이용하여 토크를 제어하는 직접제어방식이 적합하다[3],[4]. 그러나 직접제어방식은 저속영역에서 고정자 저항의 변동에 따른 고조파왜곡 때문에 토크제

어가 곤란한 문제점을 갖는다. 이러한 직접제어방식의 문제점은 저속영역에서 전동기의 단말조건에 독립적이며 비 간섭특성을 갖는 회전자자속을 이용하여 토크를 제어하는 간접제어방식에 의하여 개선될 수 있다. 그러나 간접제어방식은 제어변수가 전동기 변수의 변동에 영향을 받는다. 간접제어방식의 전동기 변수변동에 따른 유도전동기의 동특성응답은 적응제어나 가변구조제어(variable structured control)방식에 의하여 개선될 수 있으나, 제어시스템 구성의 복잡성과 유도전동기의 정확한 수학적 모델링의 요구 때문에 실제적으로 많은 문제점이 발생한다[5]-[8]. 이러한 문제점은 시스템변수의 변동에 제어기 자체가 적응적이며, 유도전동기 동특성에 대한 정확한 수학적 모델이 요구되지 않으며, 제어기 구성이 간단하고 시스템 응답이 강한 퍼지제어 방식에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[9][10].

본 논문에서는 빠른 토크응답 특성이 요구되는 견인 구동장치의 토크제어에 적합한 유도전동기 직접토크제어를 위한 퍼지제어 알고리즘을 제시하였다. 제시한 퍼지알고리즘의 입력 퍼지변수는 자속오차와 토크오차를 퍼지화 시킴으로서 구해지며 퍼지 추론방식은 자속과 전류의 벡터 도를 이용한 지식베이스를 토대로 하여 Mandani의 최소연산규칙을 이용하여 추론하였다. 실제 시스템을 제어하기 위한 비 퍼지화는 MOM(Mean of Maxima)방식을 사용하였다. 제어 값을 구하기 위한 제시한 퍼지알고리즘의 구현은 TMS320C31 DSP를 이용하였으며 인버터구동회로는 고속스위칭동작에서 성능이 우수한 IGBT를 이용하여 구성하였다.

II. 능형 유도 전동기의 발생 자속 및 토크

유도전동기의 발생 자속 ψ_r 과 발생 토크 T 는 유도 전동기를 분리 여기형 DC전동기(separately excited DC motor)와 같이 해석하기 위하여 동기속도로 회전하는 회전자 프레임을 기준으로 구할 수 있다.

3상 유도전동기의 고정자 전류 I_{as}, I_{bs}, I_{cs} 와 고정 프레임(stationary reference frame)의 두 축 D-Q의 성분 I_{Ds}, I_{Qs} 사이의 변환관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_s &= I_{Qs} - j I_{Ds} \\ &= I_{as} - j (I_{as} + 2I_{bs}) / \sqrt{3} \end{aligned} \quad (1)$$

고정 프레임 D-Q축의 전류벡터 I_s 와 동기속도 ω_e 로 회전하는 회전 프레임 d-q축의 전류벡터 I_s' 의 변환은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_s' &= I_s \exp(-j\theta_e) \\ &= I_{ds} - I_{qs} \end{aligned} \quad (2)$$

동기속도로 회전하는 프레임에 대하여 $\omega_e - \omega_r$ 의 속도로 회전하는 회전자 d-q축에 대한 능형 유도 전동기의 회전자 전압방정식은 회전자 전압을 zero로 놓음으로서 구할 수 있다.

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} + R_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r)\psi_{dr} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r)\psi_{qr} = 0 \quad (4)$$

회전자 전류의 d-q축 성분 i_{dr}, i_{qr} 은 다음과 같다.

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \quad (5)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (6)$$

식 (5),(6)을 식 (3),(4)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs} + \omega_{sl} \psi_{dr} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{ds} - \omega_{sl} \psi_{qr} = 0 \quad (8)$$

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

식 (7),(8)에서 유도전동기를 비 간섭 제어(decoupling control)하기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} \psi_{qr} &= \frac{d\psi_{gr}}{dt} = 0 \\ \psi_{dr} &= |\psi_r| = \text{일정} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)의 비 간섭 조건을 식 (7),(8)에 적용시키면 회전자 자속 $|\psi_r|$ 과 슬립 각속도 ω_{sl} 에 대하여 식 (10),(11)과 같은 간이화된 식을 구할 수 있다.

$$|\psi_r| = L_m i_{ds} \quad (10)$$

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (11)$$

또한, 회전자 자속 ψ_r 의 위상 각속도 ω_e 는 회전자 각속도 ω_r 과 슬립 각속도 ω_{sl} 의 합으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \omega_e &= \omega_r + \omega_{sl} \\ &= \omega_r + \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \end{aligned} \quad (12)$$

유동 전동기의 발생 토크 T 에 대한 일반적인 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_s \times I_s) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에 식 (9)의 조건을 적용시키면 발생 토크 T 는 다음과 같다.

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} i_{ds} \quad (14)$$

따라서, 식 (9)의 비 간섭 조건이 만족된다면 회전자 자속 ψ_r 과 발생 토크 T 는 식 (10)과 식 (14)에서 보듯이 고정자 d축과 q축 전류에 의하여 각각 독립적으로 제어된다는 것을 알 수 있다.

III. 퍼지제어 알고리즘

제시한 퍼지제어 알고리즘은 자속과 전류의 벡터 도를 이용한 직접제어 방식에 관한 경험과 지식을 기저로 하여 언어적 규칙을 제어 방식으로 변환시킨 것이다. 퍼지제어 알고리즘을 구현하는 퍼지제어기의 일반적인 형태는 그림1과 같다.

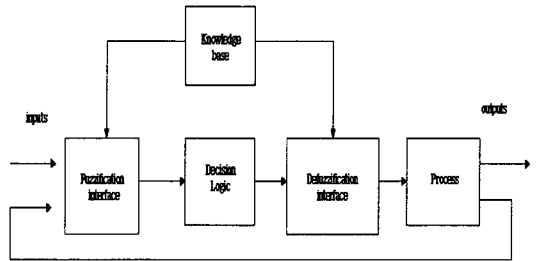


그림1. 일반적인 퍼지제어기의 계통도
Fig.1 Block diagram of a generalized fuzzy controller

3.1 퍼지화 인터페이스

퍼지화 인터페이스는 두 개의 입력상태 변수와 한 개의 출력상태 변수를 퍼지화시키는 과정을 일컫는다.

두 개의 입력상태 퍼지 변수중 하나는 기준자속 ψ^* 와 식(10)에 의하여 추정된 추정 자속 ψ 의 오차를 퍼지 연산자를 이용 식(15)와 같이 퍼지화 시킴으로서 구해지며 그림 2(a)와 같은 정규화된 삼각분포의 소속 함수를 갖는다.

$$\bar{E}_\psi = \text{fuzzifier} (E_\psi) \quad (15)$$

여기서, $E_\psi = \psi^* - \psi$:자속오차

\bar{E}_ψ :자속오차 퍼지집합

fuzzifier:퍼지화 연산자.

또 다른 입력상태 퍼지변수는 기준 토크 T^* 와 추정 토크 T 의 토크 오차 E_T 를 식(16)과 같이 퍼지화 시킴으로서 구해지며 그림2(b)와 같은 정규화된 삼각분포의 소속 함수를 갖는다.

$$\bar{E}_T = \text{fuzzifier} (E_T) \quad (16)$$

여기서, $E_T = T^* - T$:토크오차

나머지 하나의 출력상태 퍼지변수는 퍼지추론에 의하여 추론된 인버터 스위칭벡터를 퍼지화 시킨 것으로서 그림2(c)와 같은 삼각분포의 소속 함수를 갖는다.

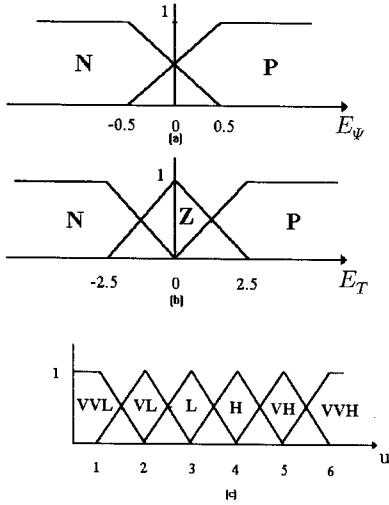


그림 2 퍼지변수의 소속 함수분포 : (a) 자속오차의 소속 함수분포 (b) 토크오차의 소속 함수분포 (c) 스위칭 상태 제어변수의 소속 함수분포

Fig. 2 Membership distribution of fuzzy variables :

- (a) Membership distribution of flux error
- (b) Membership distribution of torque error
- (c) membership distribution of switching state control variable.

3.2 퍼지규칙과 지식 베이스

퍼지규칙은 다음과 같은 IF-THEN 형태를 갖는 언어적 표현을 사용한다.

IF-THEN 형태를 갖는 i 번째 퍼지규칙 R_i 는 다음과 같다.

$$R_i: \text{IF } E_\psi \text{ is } A_i \text{ and } E_T \text{ is } B_i \text{ THEN } C \text{ is } N_i \quad (17)$$

여기서, A_i, B_i, N_i : 퍼지세그먼트

퍼지제어 알고리즘의 지식베이스는 그림3과 같은 전류와 자속의 벡터 도를 이용하여 구축하였다.

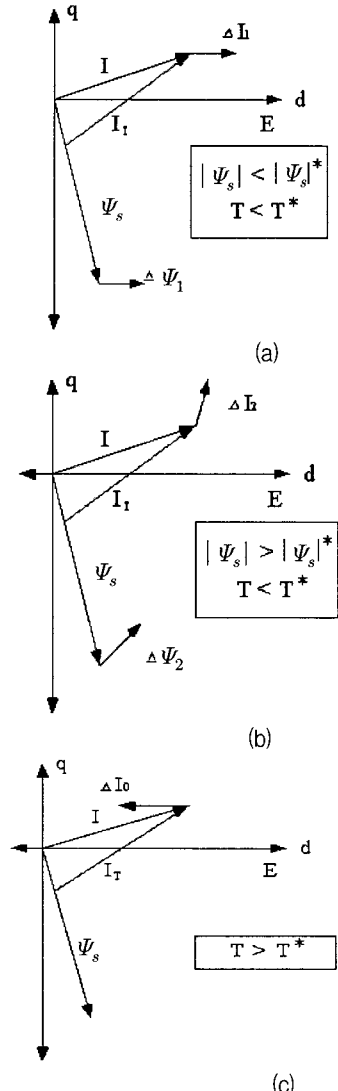


그림3.토크와 자속 오차에 따른 DSC 스위칭 벡터의 선택 방법: (a) $|\Psi_s| < |\Psi_s|^*, T < T^*$ (b) $|\Psi_s| > |\Psi_s|^*, T < T^*$ (c) $T > T^*$.

Fig.3 The DSC switching vector selection method depending on torque and flux magnitude error :

- (a) $|\Psi_s| < |\Psi_s|^*, T < T^*$ (b) $|\Psi_s| > |\Psi_s|^*, T < T^*$ (c) $T > T^*$.

그림 3에서와 같은 방식으로 구해진 지식베이스를 이용하여 구축된 각각의 퍼지규칙은 자속의 위상각 θ_e 의 위치에서 E_ψ 와 E_T 에 따라 6가지의 경우가 발생하며

θ_e 가 $\frac{\pi}{3}$ 씩 움직임에 따라 변화하므로 그림 4와같이 총 36가지의 퍼지규칙이 발생한다.

$E_\psi \backslash E_T$	P	N	$E_\psi \backslash E_T$	P	N
P	VH	VVH	P	H	VH
Z	H	VVL	Z	H	VVH
N	L	VL	N	VL	VVL

a) $\frac{3}{2}\pi \leq \theta_e < \frac{11}{6}\pi$ b) $\frac{11}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{1}{6}\pi$

$E_\psi \backslash E_T$	P	N	$E_\psi \backslash E_T$	P	N
P	VVH	VVL	P	VVL	VL
Z	VH	VL	Z	VVH	L
N	H	L	N	HV	H

c) $\frac{1}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{1}{2}\pi$ d) $\frac{1}{2}\pi \leq \theta_e < \frac{5}{6}\pi$

$E_\psi \backslash E_T$	P	N	$E_\psi \backslash E_T$	P	N
P	VL	L	P	VL	L
Z	VVL	H	Z	VVL	H
N	VVH	VH	N	VVH	VH

e) $\frac{5}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{7}{6}\pi$ f) $\frac{7}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{3}{2}\pi$

그림4. 유도전동기의 퍼지제어를 위한 총 퍼지규칙.
Fig.4 Total fuzzy rules for fuzzy control of induction motor.

3.3 퍼지결정논리

퍼지 결정논리는 퍼지규칙의 출력을 추론하는 방법으로서 본 논문에서는 최소 연산규칙을 이용하였다. 식 (17)의 퍼지규칙은 자소의 위상각 θ_e 에 대하여 2개의 퍼지입력과 1개의 퍼지출력으로 구성된 MISO(Multi-Input/Single-Output)의 형태를 갖는 퍼지시스템이다. 퍼지규칙은 퍼지 관계함수로 나타낼 수 있으며, 퍼지 출력 N_i 는 퍼지 관계함수 R_i 와 두 퍼지입력 A', B' 의 조합규칙을 이용하여 식(18)과 같이 추론된다.

$$N_i = (A', B') \circ R_i = (A', B') \circ (A_i \text{ and } B_i \rightarrow N_i) \quad (18)$$

여기서, \circ : Max-Min 연산자
퍼지 출력 N_i 의 소속 함수 μ_{N_i} 는 다음과 같다.

$$\mu_{N_i} = \min\{\mu_{A'} \circ (\mu_{A'} \rightarrow \mu_{N_i}), [\mu_{B'} \circ (\mu_{B'} \rightarrow \mu_{N_i})]\} \quad (19)$$

식(19)는 Mandani의 최소연산규칙에 의하여 다음과 같은 간이화된 식으로 주어진다.

$$\mu_{N_i} = \alpha_i \wedge \mu_{N_i} \quad (20)$$

여기서, $\alpha_i = \mu_{A_i}(E_\psi) \wedge \mu_{B_i}(E_T)$

i 번째 제어규칙의 출력 N_i 와 전체의 제어규칙 출력 N 과의 관계는 다음과 같다.

$$N = \bigcup_{i=1}^n N_i \quad (21)$$

이때 출력 N 의 소속 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\mu_N = \text{Max}_{i=1}^n \mu_{N_i} \quad (22)$$

3.4 비 퍼지화

비 퍼지화란 퍼지추론에 의하여 구해진 퍼지출력 N 에 대응하는 실제 시스템의 제어치를 구하기 위한 방법으로서 본 논문에서는 식(23)와 같은 MOM(Mean of Maxima)를 이용하였다.

$$n = \sum_{j=0}^l \frac{W_j}{l} \quad (23)$$

여기서, W_j : 최대의 소속 함수 값을 갖는 서포트의 값
 l : 최대의 소속 함수 값을 갖는 서포트의 개수

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제시한 유도전동기의 구동원리는 기존의 DSC 제어 방식을 기저로하여 작동하게 하였으며, 실험에 사용한 유도 전동기의 규격은 표 1과 같고 그림 5는 제시한 제어시스템의 구조를 보여준다.

표1.모델 8221 농형 유도전동기의모터변수 규격
Table1 Parameter of the model 8221 squirrel cage induction motor

Motor Parameter	Specification
number of pole	4
Magnetizing reactance (X_m)	180 Ω
Stator leakage reactance (X_{sl})	8.2 Ω
Rotor leakage reactance (X_{rl})	8.2 Ω
Stator resistance (R_s)	12.5 Ω
Rotor inertia moment (J)	0.0022 $kg \cdot m^2$

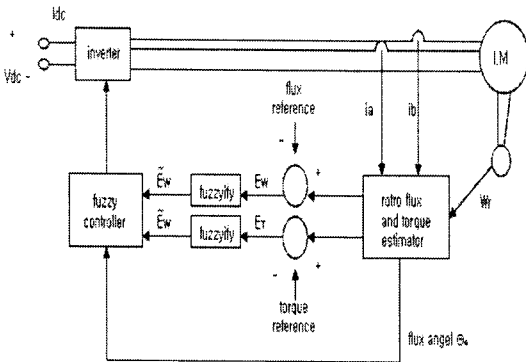


그림 5.제시한 DSC 퍼지 제어시스템의 블럭도
Fig.5. Block diagram of the fuzzy controller for DSC

제시한 제어시스템은 그림6에서 보듯이 속도(토크)를 제어하는 외부 루프와 퍼지 제어 알고리즘을 이용한 토크제어를 위한 인버터 구동 스위칭 패턴을 발생시키는 내부 루프로 구성하였다. 제시한 제어 알고리즘의 소프트웨어 구현은 실시간 처리가 가능한 TMS320C31 DSP를 이용하였으며 인버터구동회로는 고속스위칭동작에서 성능이 우수한 IGBT를 이용하여 구성하였다

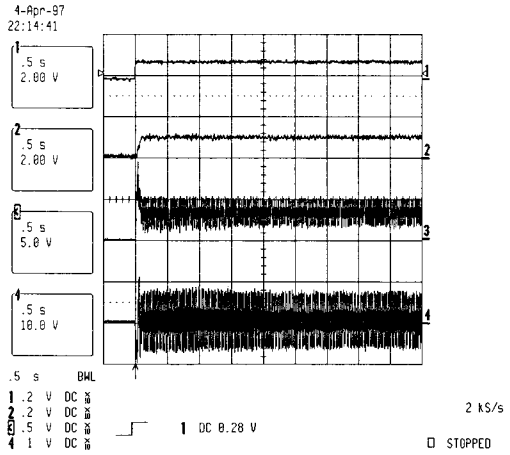


그림 6. 무 부하상태 시 전동기 명령속도를 0 rpm에서 1750 rpm으로 변동할 경우 기동토크응답
Fig.6. The start-up response to a command speed change from 0 to 1750 rpm with unloaded.

그림6은 무부하시 기준 명령 전동기 속도를 0 rpm에서 1750 rpm으로 변동시킬 경우의 제시한 제어기의 기동 토크 응답을 보여준다. 채널 1,2,3,4는 각각 기준 명령 속도, 전동기 회전자 속도, q-축 전류 그리고 a-상전류를 나타낸다. 그림에서 유도 전동기가 기준 명령 속도에 0.15 sec 이내의 빠른 가속 토크응답특성을 나타냄을 알 수 있다.

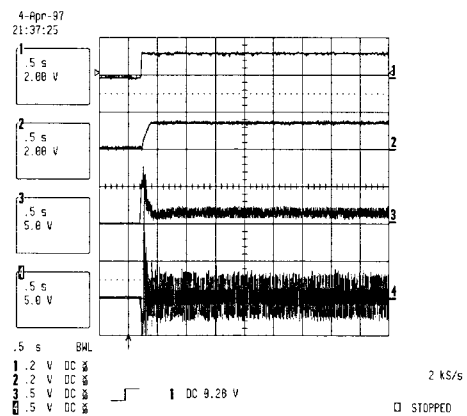


그림 7. 전 부하상태에서 전동기 명령속도를 0 rpm에서 1750 rpm으로 변동 시 기동토크응답.
Fig. 7 The start-up response to a command speed change from 0 to 1750 rpm with full-loaded.

그림 7은 전 부하시 그림 7에서와 같은 조건하의 기동 토크응답을 보여준다. 그림 7에서 유도 전동기는 무부하시나 전부하시 같은 토크응답 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

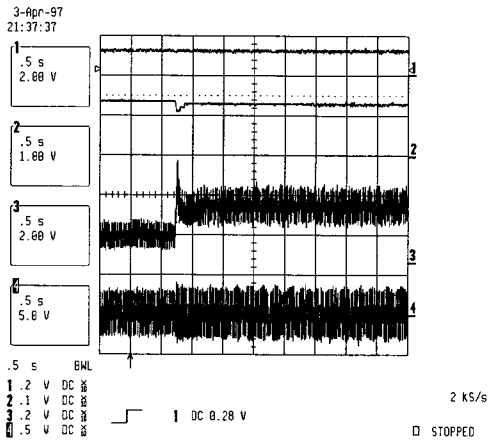


그림 8. 1750 rpm에서 동작하는 유도전동기의 부하를 갑자기 변동할 경우 동적속도응답.
Fig.8 The dynamic speed response to a sudden load change when operating at 1750 rpm.

그림 8은 부하의 변동에 대한 유도 전동기의 동특성 응답을 보여준다. 그림 8에서 부하의 급속한 변동에 대하여 유도전동기는 좋은 속도응답특성을 갖고 있음을 보여주며 제시한 제어기의 성능이 동작 조건의 변동에 민감하지 않고 강인한 특성을 갖고 있음을 보여준다.

V. 결론

본 논문은 DSC 원리를 기저로하여 일정한 자속 하에서 빠른 토크응답특성과 부하의 갑작스런 변동 하에서 좋은 동특성응답을 갖는 유도전동기의 직접토크제어를 위한 퍼지제어를 제시하였다.

실험결과 제시한 제어기는 부하시, 무부하시 빠른 토크응답특성 및 동특성응답을 나타냈으며 퍼지제어기 자체의 적응적 특성으로 인하여 구동시스템 설계 시 회전자 변수의 정확한 값이 요구 되지 않으며 구동 조건 및 시스템 변수의 변동에 민감하지 않고 강인한 특성을 갖는다.

참고문헌

- [1] F.Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the New TRANSVECTOR Closed Loop Control System for Rotating Field Machine," Siemens Review, Vol.34, pp.217-220, May, 1972.
- [2] K.Hasse, "Zur Dynamik drehzahleregelter Antriebe mit Stromrichtergespeisten Asynchron- Kurzschlu Blanfermaschinen", Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss., 1969.
- [3] M.Dепенbrock, "Direct Self Control(DSC) of inverterfed induction machines," IEEE Trans. Power Electron., vol.3, no.4, pp.420-429, Oct.,1988.
- [4] I.Takashi and Y.Ohmori, "High direct torque control of an induction machine," IEEE Trans. Industry Application, vol.25, no.2, pp.257-264,1989.
- [5] H.Suimoto and S.Tamai, "Secondary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics," IEEE Trans. Indust. Appl., vol.IA-23, pp.296-303, 1987.
- [6] L.J.Graces, "Parameter Adaption for the speed controlled static AC Drive with Squirrel Cage Induction Motor," Conf.Rec.IEEE/IAS Annu.Meet pp.843-850,1979.
- [7] B.K.Bose, "Technology trends in microcomputer control of electrical machines," IEEE Trans. Indust. Electron.,vol35, pp.160-177,1988.
- [8] B.K.Bose, "Sliding Mode Control of Induction Motor," Conf. Rec. IEEE/Annu. Meet., pp.479-486,1985.
- [9] 변증남, "퍼지논리제어," 홍릉과학출판사, pp.175-177, 1997.
- [10] Wei.Li, "Deign of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller," IEEE Trans. Fuzzy System, vol.,Nov.,1998.

저자소개



한 상 수(Sang Soo Han)

1982년 명지대학교
전자공학과 학사

1985년 명지대학교
전자공학과 공학석사

1995년 홍익대학교 전자공학과 공학박사

현재: 강원대학교 정보통신공학과 교수

※관심분야: 지능 및 퍼지제어, 전력전자제어, 로봇제어