

다중 적응 퍼지제어기를 이용한 유도전동기 드라이브의 고성능 제어

(High Control of Induction Motor Drive using Multi Adaptive Fuzzy Controller)

최정식* · 고재섭 · 정철호 · 김도연 · 정병진 · 정동화

(Jae-Sub Ko* · Jung-Sik Choi · Chul-Ho Jung · Do-Yeon Kim · Byung-Jin Jung · Dong-Hwa Chung)

Abstract

The field oriented control of induction motors is widely used in high performance applications. However, detuning caused by parameter disturbance still limits the performance of these drives. In order to accomplish variable speed operation, conventional PI-like controllers are commonly used. These controllers provide limited good performance over a wide range of operation, even under ideal field oriented conditions.

This paper is proposed adaptive fuzzy controller(AFC) and artificial neural network(ANN) based on the vector controlled induction motor drive system. Also, this paper is proposed control of speed and current using fuzzy adaptation mechanism(FAM), AFC and estimation of speed using ANN.

The proposed control algorithm is applied to induction motor drive system using FAM, AFC and ANN controller. Also, this paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of this controller.

Key Word : Induction Motor Drive, FAM, AFC, ANN, BPA, Speed Control, Speed Estimation

1. 서론

최근 간접 벡터제어를 적용한 유도전동기 드라이브는 고성능 제어를 위하여 산업 적용분야에 광범위하게 사용되고 있다. 이는 유도전동기 드라이브가 간단하고 고속 응답 특성을 가지고 있으며 강인성, 가격, 신뢰성 및 효율성이 우수하다는 장점 때문이었다[1].

산업분야에 가장 많이 사용되는 제어기는 PI 제어기이다. 이는 간단한 구조와 광범위한 동작조건에서 양호한 성능을 발휘할 수 있기 때문이었다. 그러나 PI 제어기는 외부의 외란 및 파라미터 등에 매우 민감하고 고정 이득은 다양한 동작점에 대한 응답을 충족시키기가 어렵다[2]. 이러한 조건을 충족시키기 위하여 동작조건 및 드라이브 파라미터의 적응제어를 사용해야 한다. SMC(Sliding Mode Control)[3], MRAC(Model Reference Adaptive Control)[4], STC(Self Tuning Control)[5] 등 다양한 적응제어 기법이 제시되었다. 이 기법은 전동기 파라미터, 부하 토크 및 관성과 같은 광범위한 동작변화에도 양호한 속도응답을 얻을 수 있는 우수한 기법으로 평가를 받았다. 그러나 이 기법은 정확한 수학적 모델링이 필요하고 명확한 동조능력을 구현하는데 어려운 문제점이 있었다. 산업 분야의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 반드시 필요하다.

최근에는 퍼지제어 기법이 유도전동기 드라이브의 제

어에 적용되었다[6]. 직접 퍼지제어에서 적응 퍼지제어, 파라미터 변동을 고려한 퍼지제어, 새로운 퍼지제어 등 다양한 연구가 진행되었다. 그리고 신경회로망을 이용하여 유도전동기의 속도 제어 및 추정을 하여 양호한 결과를 얻을 수 있었다[7]. 그러나 퍼지제어 및 신경회로망이 상호 장단점이 있으므로 이러한 제어기의 장점만을 유기적으로 결합하는 혼합형태의 연구가 활발하게 진행되었다. 퍼지제어와 신경회로망을 혼합한 FNN(Fuzzy-Neural Network) 제어기[8], FNN 제어기를 보상하는 적응 FNN 제어기[9] 등 다양한 연구가 이루어졌다. 이러한 연구들은 고속 및 저속의 속도변화, 부하 변동, 관성 변화 및 정·역회전 운전 등 다양한 동작에도 양호한 특성을 얻을 수 있었다. 그러나 이 연구들은 대부분 속도제어에만 적용하였으며 전류제어기는 적용하지 않았다. 전류제어기의 높은 PI 이득은 전류응답을 악화시켜 드라이브의 동적 성능의 저하를 초래한다. 따라서 전류제어기에도 고성능 제어가 필요하고 속도 및 부하 토크 등 파라미터의 변동 등에 대하여 더욱 강인성 및 고성능 제어를 성취하기 위한 새로운 기법이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 유도전동기의 제어와 추정을 위하여 FAM(Fuzzy Adaption Mechanism)으로 PI 제어기의 이득을 추정하여 속도를 제어한다. AFC(Adaptive Fuzzy Controller)로 전류를 제어하며 ANN(Artificial Neural Network)에 의해 속도를 추정한다. 본 논문에서 제시한 제어기의 제어특성과

추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 시스템 구성 및 모델링

본 논문에서는 공간벡터 PWM 인버터에 의해 구동되는 고성능 유도전동기의 벡터제어 시스템을 고려한다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.

그림 1은 공간벡터 PWM 인버터에 의하여 구동되는 일반적인 IM 드라이브의 벡터제어 시스템을 나타낸다.

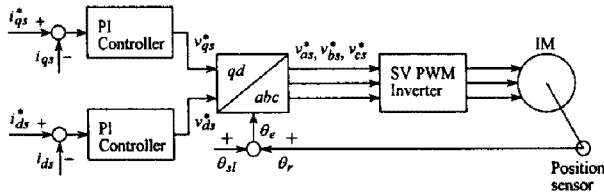


그림 1. IM의 벡터제어 시스템
Fig. 1. Vector control system of IM

i_{qs}^* 와 i_{ds}^* 는 지령 토크 및 자속 성분의 전류를 나타내며 실제전류 i_{qs} 와 i_{ds} 와 비교하여 종래의 PI 제어기를 이용하여 제어한다. PI 제어기의 출력은 v_{qs}^* 와 v_{ds}^* 이며 이는 좌표변환에 의해 v_{as}^* , v_{bs}^* , v_{cs}^* 로 변환하여 공간벡터 PWM 인버터에 의해 유도전동기를 제어한다. 회전자 위치정보 θ_r 는 좌표변환에 이용한다.

3상 Y 결선 유도전동기의 동적 모델은 $d-q$ 축 동기 회전축에서 표현하면 미분 방정식은 다음과 같다.

$$P \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_r}\right) & \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r \\ \omega_r & -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_r}\right) & \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_r}{L_s} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & (\omega_r - \omega_s) \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_s} & -(\omega_r - \omega_s) & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^* \\ v_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (2)$$

여기서, σ 는 다음 식과 같다.

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r) \quad (3)$$

그리고 L_s, L_r, L_m : 고정자, 회전자 및 상호 인덕턴스

R_s, R_r : 고정자 및 회전자 저항

$\omega_e, \omega_r, \omega_{sl}$: 동기, 회전 및 슬립 속도

보상을 위한 비간섭 제어는 인버터 출력전압을 선정한다.

$$v_{ds}^* = \left(k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (i_{ds}^* - i_{ds}) - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^* \quad (4)$$

$$v_{qs}^* = \left(k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (i_{qs}^* - i_{qs}) + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^* + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \phi_{dr} \quad (5)$$

3. 다중 적응 퍼지제어기

다중 적응 퍼지제어기를 이용하여 유도전동기 드라이브의 속도 제어 및 추정에 대한 시스템의 구성도는 그림 2와 같다. FAM(Fuzzy Adaption Mechanism)으로 PI 제어기의 이득을 추정하여 속도를 제어하는 FAM-PI 제어기가 있다. AFC(Adaptive Fuzzy Controller)는 전류를 제어하고 ANN에 의해 속도를 추정한다[10].

PI 제어기의 두 개의 이득이 잘 알려진 종래의 방법을 이용하여 초기화한다. 그러나 이 이득은 정격 동작 조건에서 유도전동기의 추정모델에 의존한다. PI 제어기의 두 개의 이득을 동조하기 위한 퍼지 알고리즘은 파라미터가 변동할 경우에 양호한 성능을 유지하기 위하여 사용한다. 이는 ΔK_p 와 ΔK_i 를 발생시키기 위하여 퍼지 룰을 사용한다. 이 룰의 설계는 정량적인 지식에 기초하며 여러 동작조건에서 K_p 와 K_i 의 다양한 값을 위한 종래의 PI 제어기를 해석하여 구한다.

FAM에서 입력은 속도 오차 e 와 속도 오차의 변화 ce 이고 출력은 두 개의 이득 K_p 와 K_i 이다. K_p 와 K_i 를 경신하기 위한 퍼지 룰은 표 1에 나타낸다. 퍼지집합은 같은 폭으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

퍼지 동조기는 두 개의 출력 언어변수의 비퍼지화를 위하여 무게중심법을 사용하여 PI 제어기의 이득의 적절한 변화를 얻는다. 이 두 개의 이득은 다음과 같이 경신한다.

$$K_p = K_p + K_{kp} f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (6)$$

$$K_i = K_i + K_{ki} f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (7)$$

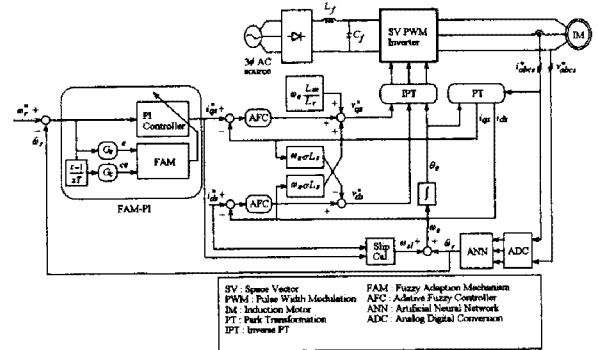


그림 2. 유도전동기 드라이브를 위한 적응학습 퍼지 뉴로 제어기

Fig. 2. Adaptive learning fuzzy neuro controller for induction motor drive.

표 1. 이득을 갱신하기 위한 룰 베이스
Table 1. Rule base to update gain

		(가) K_i								(나) K_p							
$\frac{e(k)}{e(k-1)}$	$e(k)$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL		
NL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE		NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE		
NM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS		NM	NL	NL	NM	NS	ZE	PS		
NS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM		NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS		
ZE	PL	PM	PS	ZE	PS	PM	PL		ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM		
PS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM		PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL		
PM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS		PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL		
PL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE		PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL		

드라이브의 안정화를 위하여 이득 K_p 와 K_i 는 정상 상태에 도달하면 제한하고 지령속도가 변화할 경우에는 초기화한다. 첫 번째는 추론 룰 표에서 이득 K_i 는 속도 오차를 정 방향으로 크게 하거나 부 방향으로 경우에는 더욱 증가시키고 속도의 오차변화를 정 방향으로 크게 하거나 부 방향으로 경우에는 더욱 감소시킨다. 이는 속도의 상승시간이 개선되지만 오버슈트에 의한 속도응답이 지연된다. 두 번째는 이득 K_p 는 오차와 오차변화가 정 방향으로 클 경우에는 증가시키고 부 방향으로 작을 경우에는 감소시킨다. 이는 속도의 오버슈트와 정상상태의 오차를 감소시킨다.

적용 시스템의 적응과정은 2개의 퍼지제어기로 동작한다. 그림 3은 두 개의 퍼지동작의 상호작용을 나타내며 DFC(Direct Fuzzy Controller)는 종래의 일반적인 퍼지제어기이고 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)는 기준 모델을 고려한 적응 퍼지제어기를 나타낸다.

DFC 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta v_{qs1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta v_{qs2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전압을 얻는다.

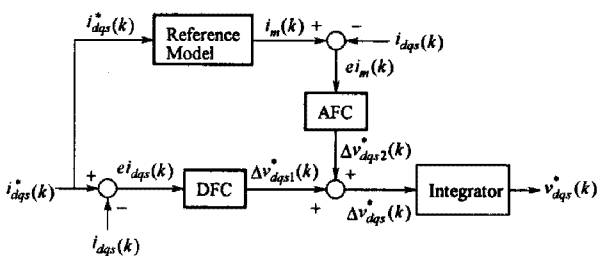


그림 3 적응 퍼지제어기
Fig. 3 adaptive fuzzy controller

4. 시스템 성능 및 결과

그림 4는 0.1[sec]에 1800[rpm]으로 운전중 지령속도를 0.4[sec]에 1200[rpm]로 변화시키고, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 5[N.m]인가하였을 경우 응답특성을 나타낸다. 그림 4(가-a)는 지령속도와 추정속도, 그림 4(가-b)와 4(가-c)는 FAM-PI 제어기에서 구한 이득 k_p , k_i 를 나타내고, 그림 4(가-d)는 q 축 전류를 나타

낸다. 그림 4(나)는 그림 4(가)를 명확하게 검토하기 위해 그림 4(가)의 과도상태 및 부하인가에 따른 응답특성을 확대하여 해석한 결과를 나타낸다. 그림 4(나-a)는 속도상승에 따른 응답특성, 그림 4(나-b)는 속도하강에 따른 응답특성, 그림 4(나-c)는 부하인가에 따른 응답특성을 나타낸다. FAM-PI 제어기가 종래의 PI 제어기에 비하여 오버슈트가 작고 상승시간이 빠르며, 안정화 시간도 짧아 우수한 성능이 나타난다.

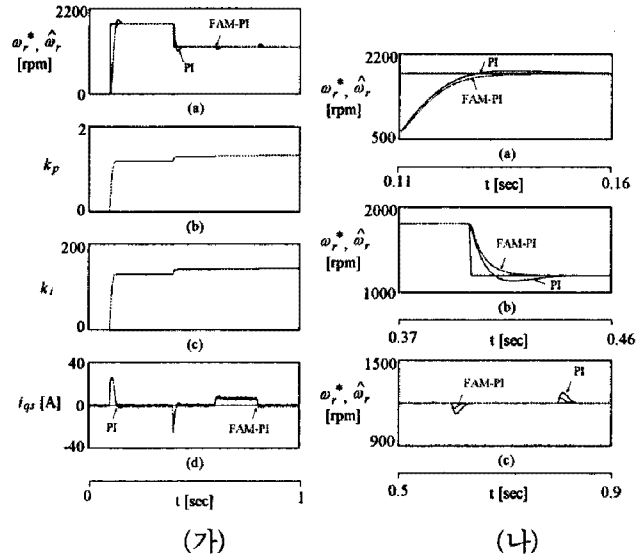


그림 4. 속도 및 부하 변화에 대한 속도 응답특성
Fig. 4. Speed response characteristic with command speed and load torque variation

그림 5는 관성 및 회전자 저항 등의 파라미터가 변동하였을 경우 응답특성을 나타낸다. 그림 5(가)는 관성이 3배 가되었을 경우 응답특성을 나타내며, 그림 5(나)는 전기자 저항이 3배가되었을 경우 응답특성을 나타낸다. 관성 및 회전자 저항 등의 파라미터가 변동하였을 경우에도 본 논문에서 제시한 FAM-PI 제어기가 종래의 PI 제어기에 비하여 양호한 응답특성을 나타내고 있다.

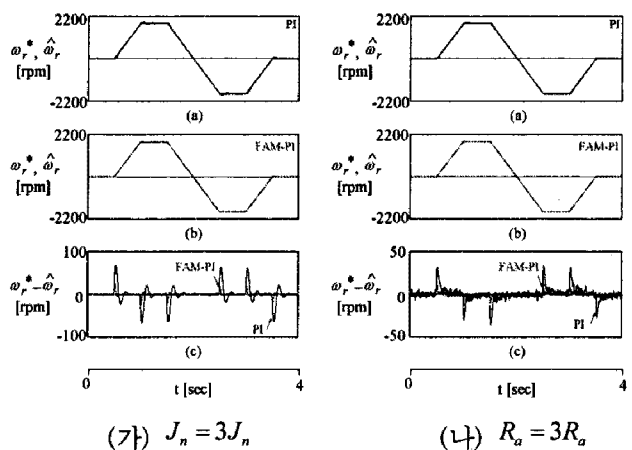


그림 5. 파라미터 변화에 대한 4상한 운전 응답특성
Fig. 5. Response characteristic of quadrant drive with parameter variation

그림 6은 ANN에 의한 속도추정에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도, 6(b)는 지령속도와 추정속도, 6(c)는 q 축 전류, 6(d)는 실제속도와 추정속도의 오차를 나타낸다. 그림 6(d)에서 추정오차는 1% 내로 추정정능이 매우 우수하다.

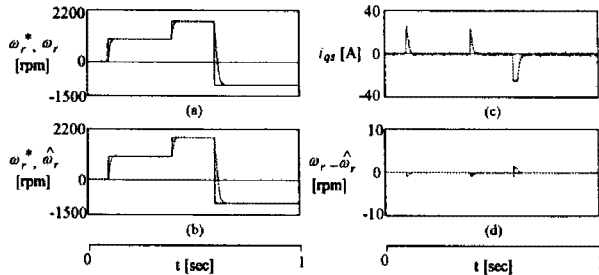


그림 6. 속도추정에 대한 응답특성
Fig. 6. Speed response characteristic with speed estimation

그림 7은 정·역 운전에 대한 전류 응답특성을 나타낸다. 그림 7(가)은 PI 제어, 7(나)은 AFC의 응답특성으로서 그림 (a)는 지령속도와 추정속도, 그림 (b)는 지령 a상 전류, 그림 (c)는 실제 a상 전류, 그림 (d)는 전류오차, 그림 (e)는 스위칭 시간을 나타낸다. 그림 7(가-d)와 그림 7(나-d)에서 본 논문에서 제시한 AFC 제어기에 의한 전류오차가 PI 제어기에 의한 전류 오차보다 작아 양호한 응답특성을 나타낸다.

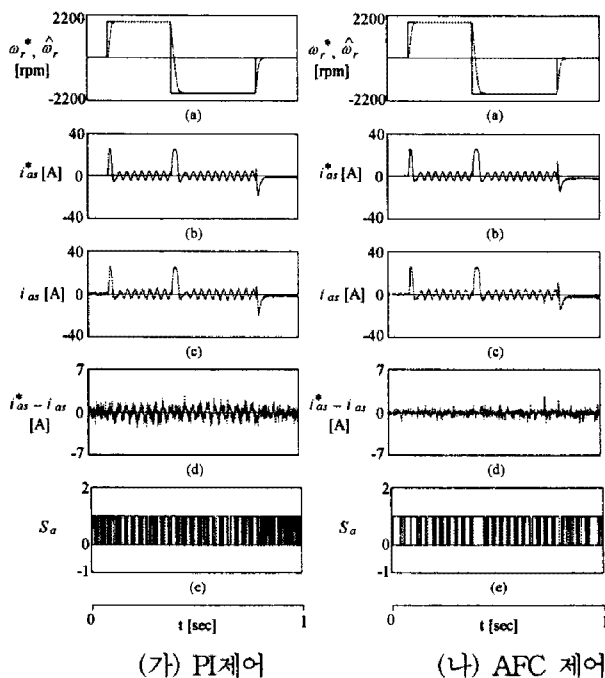


그림 7. 정·역운전에 대한 전류 응답특성
Fig. 7. Current response characteristic with forward and reverse operation

5. 결 론

본 논문에서는 FAM-PI(Fuzzy Adaption Mechanism-PI)

에 의한 유도전동기의 속도제어 및 ANN(Artificial Neural Network)에 의한 속도 센서리스와 AFC(Adaptive Fuzzy Control)에 의한 전류제어를 제시하여 고성능 속도제어 및 추정과 전류제어를 얻을 수 있었다. 제시한 FAM-PI 제어기의 FAM(Fuzzy Adaption Mechanism)은 퍼지제어와 적응제어를 혼합한 형태이며 FAM 제어기를 통해 PI 제어기의 이득값을 운전 상태에 따라서 자동으로 갱신시키고, 갱신된 이득 값으로 유도전동기의 속도를 제어하였다. AFC 제어기는 기준모델을 고려한 AFC와 종래의 퍼지제어인 DFC를 혼합한 형태이며 AFC를 이용하여 유도전동기의 전류를 제어하였다. 제시한 FAM-PI 제어기 및 AFC 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 속도제어 및 전류제어의 성능이 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 속도, 부하토크, 관성 및 저항 등 파라미터 변동에도 양호한 제어 응답특성을 얻을 수 있었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용한 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 FAM-PI 및 AFC제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

본 과제(결과물)는 교육과학기술부·지식경제부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] B. K. Bose, "Modern power electronics and AC drives," Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 2002.
- [2] Gy. Juhasz, S. Halasz and K. Veszpremi, "New aspects of a direct torque controlled induction motor drive," IEEE International Conference on IT, vol. 1, pp. 43-48, 2000.
- [3] Y. Zhang, Z. Zhao and G. Song, "A full sliding mode sensorless control of three-level inverter-fed induction motors," in Proc. IEEE PESC, pp. 2825-2831, 2008.
- [4] L. A. S. Ribeiro, C. R. Jacobina, A. M. N. Lima and A. C. Oliveira, "MRAC strategies for an IFO controlled AC motor drive with parameter estimation," 27th Annual IEEE PESC '96 Record, vol. 2, pp. 1222-1228, 1996.
- [5] S. Yaacob and F. A. Mohamed, "Real time self tuning controller for induction motor based on PI method," 38th Annual Conference Proceedings of the SICE, pp. 909-914, 1999.
- [6] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIEE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [7] M. T. Wishart and R. G. Harley, "Identification and control of induction machines using neural networks," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 612-619, 1995.
- [8] H. G. Lee, S. M. Nam, J. S. Ko, J. S. Choi, J. C. Lee and D. H. Chung, "MTPA control of induction motor drive using fuzzy-neural networks controller," ICCAS 2005, p. 134, 2005.
- [9] J. C. Lee, H. G. Lee and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed control of induction motor drive using adaptive FNN controller," International Conference ICEMS'04, Conference no. PI-5(430-M09-052), 2004. [CD no. 2]
- [10] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Efficiency Optimization Control of SynRM with ANN Speed Estimation," KIEE, vol. 55P, no. 3, pp. 117-122, 2006.