

# 다중 HBPI 제어를 이용한 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어

(Maximum Torque Control of Induction Motor Drive using Multi-HBPI Controller)

강성준\* · 고재섭 · 최정식, 백정우, 장미금, 김순영, 정동화

(Sung-Jun Kang\*, Jae-Sun Ko, Jung-Sik Choi, Jeong-Woo Baek, Mi-Geum Jang, Soon-Young Kim, Dong-Hwa Chung)

## Abstract

The maximum output torque developed by the machine is dependent on the allowable current rating and maximum voltage that the inverter can supply to the machine. Therefore, to use the inverter capacity fully, it is desirable to use the control scheme considering the voltage and current limit condition, which can yield the maximum torque per ampere over the entire speed range. This controller is controlled speed and current using hybrid PI(HBPI) controller and estimation of speed using ANN. Also, this paper is proposed control of maximum torque per ampere(MTPA) of induction motor. This strategy is proposed which is simple in structure and has the honest goal of minimizing the stator current magnitude for given load torque. The performance of the proposed induction motor drive with maximum torque control using HBPI controller is verified by analysis results at dynamic operation conditions.

### 1. 서론

유도전동기는 AC 서보, 견인 및 전기자동차, 스피너 드라이브와 같은 다양한 적용분야에 많이 사용되고 있다. 유도전동기의 고성능 토크제어는 지령 전류를 추종하는 전류제어를 위하여 빠르고 충분한 전류응답을 필요로 한다. 가변속 제어 시스템은 생산력을 높이기 위하여 가능한 고속으로 지령 속도를 추종해야 한다. 입력 전압과 전류의 조건에서 최대토크를 발생시킬 수 있는 제어방식이 필요하다.[1] 최근 퍼지제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘 등을 이용한 인공지능 제어는 전력전자 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 기법으로 인식되고 있다. 그리고 이들 기법간의 상호 혼합한 방식은 적용성 및 강인성이 요구되는 유도전동기 드라이브에서 진가가 유감없이 발휘될 전망이다.[2-6]

본 논문에서 HBPI(Hybrid PI) 제어기는 유도전동기의 속도 및 전류를 제어하고 출력성분인 지령 토크를 이용하여 최대토크 제어를 수행한다. 그리고 ANN(Artificial Neural Network)을 이용하여 유도전동기의 속도를 추정한다. 유도전동기 드라이브 시스템을 구성하고 제시한 제어를 적용하여 다양한 성능과 최대토크의 특성을 분석한다. 그리고 본 논문의 효용성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하고 결과를 제시한다.

### 2. 유도전동기의 모델링

고정자 전류는 입력이고 회전자 권선은 단락되어 있으므로 상태방정식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$0 = \frac{R_r}{L_r}(\phi_{qr} - L_m i_{qr}) + p\phi_{qr} + \omega_s \phi_{dr} \quad (1)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r}(\phi_{dr} - L_m i_{ds}) + p\phi_{dr} - \omega_s \phi_{qr} \quad (2)$$

여기서  $L = L_s + \frac{L_m L_r}{L_r + L_m}$  이다. 간접 벡터제어[3]에서는  $\theta_s(0)$ 는  $\phi_{qr}$ 가 영이 되도록 선정한다. 식 (1)과 (2)는 다음 식과 같다.

$$0 = -\frac{R_r L_m}{L_r} i_{qr} + \omega_s \phi_{dr} \quad (3)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r}(\phi_{dr} - L_m i_{ds}) + p\phi_{dr} \quad (4)$$

$i_{ds}$ 가 일정하게 유지하기 위하여 제어하면 식 (4)에서  $p\phi_{dr} = 0$ 이다.

$$\phi_{dr} = L_m i_{ds} \quad (5)$$

식 (3)에서  $\omega_s$ 에 대하여 풀면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{R_r i_{qr}}{L_r i_{ds}} \quad (6)$$

토크 식도 다음 식과 같다.

$$T_e = K \frac{L_m^2}{L_r} i_{qr} i_{ds} \quad (7)$$

고정자 전류크기는 피크 교류전류로서 정의한다.

$$|i_s| = \sqrt{i_{qr}^2 + i_{ds}^2} \quad (8)$$

고정자 자속도 전류와 유사하게 정의한다.

$$|\phi_s| = \sqrt{\phi_{qs}^2 + \phi_{ds}^2} \quad (9)$$

### 3. 최대토크 제어

식 (7)에서  $i_{ds}$ 와  $i_{qs}$ 의 곱을 최대화 하는 슬립 각속도를 구한다. 따라서 이러한 조건을 이용하여  $i_{qs}$ 는  $i_{ds}$ 와 같게 설정해야 하며 식 (6)에서 다음 식을 얻는다.

$$\omega_s, \text{MTPA} = \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{\tau_r} \quad (10)$$

여기서  $\tau_r$ 는 회전자 시정수이다. 최대토크로 제어하기 위하여 최소 고정자 전류를 유지해야 하며 식 (10)에서 회전자 시정수의 역인 일정한 슬립 각속도에서 운전시켜야 한다. 최대 토크 및 최소 고정자 전류에서 동작은 동작조건이 존재하므로 전 속도와 토크 영역에서 운전하기가 어렵다. 이러한 동작조건은 다음과 같이 가정한다. 1) 고정자 전류는 설정 최대치를 초과할 수 없다. 2) 고정자 자속은 설정 최대치를 초과할 수 없다. 3) 고정자 전압은 정격치를 초과할 수 없다. 조건 2)를 만족하면 조건 3)은 정격치 보다 낮은 회전자 속도에서 동작하기 위하여 만족한다. 이러한 제한 조건을 만족하기 위하여 고정자 전류와 자속은 선정된 독립변수에 의해 쉽게 표현할 수 있다.

$$|\phi_s| = \sqrt{T_e \left( \frac{a}{\omega_s} + b\omega_s \right)} < |\phi_s|_{\max} \quad (11)$$

여기서

$$a = \frac{R_r [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2L_m^2 L L_r]}{L_r^2 L_m^2} \quad (12)$$

$$b = \frac{L^2 L_r^2}{R_r L_m^2} \quad (13)$$

$$|i_s| = \sqrt{T_e \frac{L_r}{L_m} \left( \frac{1}{\tau_r \omega_s} + \tau_r \omega_s \right)} < |i_s|_{\max} \quad (14)$$

자속이 정격보다 낮으면 최대 슬립 각속도는 식 (10)과 같다. 매우 큰 토크에 대하여 슬립 각속도는 자속 조건을 초과할 수 없다. 동작의 자속제한 모드에서 슬립 각속도의 표현은 식 (11)에서  $|\phi_s|=1$ 로 설정하여 얻을 수 있으며  $\omega_s$ 를 구하면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 c}}{2T_e b} \quad (15)$$

여기서

$$c = \frac{L^2 [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2L_m^2 L L_r]}{L_m^4} \quad (16)$$

일정 슬립과 동작의 자속 제한영역 사이에서 한계점

은 식 (10)에서  $\omega_s$ 에 의하여 설정되고 한계점을 초과하는  $\omega_s$ 는 식 (15)를 이용한다. 식 (15)에서 한계  $T_e$ 를 구하면 다음 식과 같다.

$$T_{e, \text{bp}} = \frac{R_r L_r}{b L_r^2 + (c R_r)^2} \quad (17)$$

$T_e < T_{e, \text{bp}}$ 에서 필요한 각 속도는 식 (10)에서 주어지고  $\tau_r \omega_s = 1$ 이다.  $T_e > T_{e, \text{bp}}$ 에서 필요한 슬립 각속도는 식 (15)에서 주어지고  $\tau_r \omega_s$ 는 다음 식과 같다.

$$\tau_r \omega_s = \frac{(1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 b}) L_m^2}{2T_e L^2 L_r} \quad (18)$$

식 (17)을  $i_{qs}$ 에 대한 식으로 풀면 다음 식과 같다.

$$i_{qs} = \frac{K_1 T_e}{i_{ds}} \quad (19)$$

여기서  $K_1 = L_r / K L_m^2$ 이다.

식 (19)을 식 (18)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$|i_s| = \sqrt{(K_1 T_e)^2 i_{ds}^{-2} + i_{ds}^2} \quad (20)$$

$|i_s|$ 가 최소가 되는  $i_{ds}$ 를 구하기 위하여  $di_s / di_{ds} = 0$  조건을 구한다.

$$i_{ds} = \sqrt{K_1 T_e} \quad (21)$$

HBPI를 이용한 최대토크 제어에 대한 블록도는 그림 1과 같다.

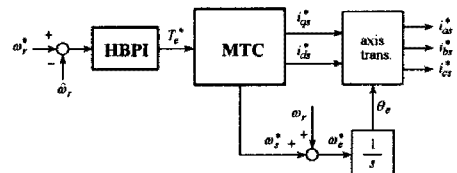


그림 1 HBPI 제어기를 이용한 최대토크 제어의 블록도  
Fig. 1 Block diagram of maximum torque control using HBPI controller

HBPI에 의해 제어되는 유도전동기 드라이브의 최대 토크 제어의 전체 시스템은 그림 2와 같다.

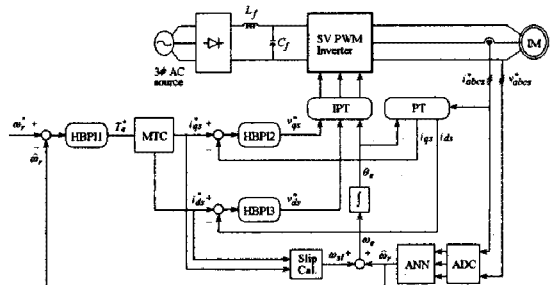


그림 2 HBPI를 이용한 유도전동기 드라이브의 제어 시스템  
Fig. 2 Control system of induction motor drive using HBPI

### 4. HBPI 제어기의 설계

HBPI1 제어기의 설계는 그림 3과 같다.  $K_p$ 와  $K_i$ 를

갱신하기 위한 퍼지 룰은 표 1과 표 2에 나타낸다. 퍼지 집합은 같은 쪽으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

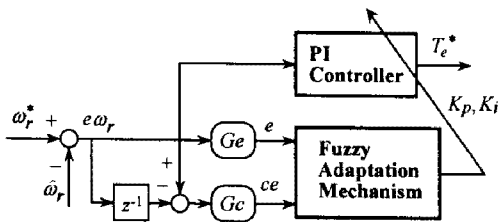


그림 3 HBPI 제어기의 구조  
Fig. 3 The structure of HBPI controller

표 1 이득 $K_i$ 를 갱신하기 위한 룰 베이스 Table 1 Rule base to update gain $K_i$									표 2 이득 $K_p$ 를 갱신하기 위한 룰 베이스 Table 2 Rule base to update gain $K_p$								
$e\omega_r$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB		$e\omega_r$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
NB	Z	NS	NM	NB	NM	NS	Z		NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS	
NM	PS	Z	NS	NM	NS	Z	PS		NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS	
NS	PM	PS	Z	NS	Z	PS	PM		NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM	
Z	PB	PM	PS	Z	PS	PM	PB		Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
PS	PM	PS	Z	NS	Z	PS	PM		PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	
PM	PS	Z	NS	NM	NS	Z	PS		PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB	
PB	Z	NS	NM	NB	NM	NS	Z		PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB	

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

$$K_p = K_p + K_{kp} f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (22)$$

$$K_i = K_i + K_{ki} f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (23)$$

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) + \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) + \frac{\eta}{T} \{ \phi_{qr}(k) - \hat{\phi}_{qr}(k) \} \hat{\phi}_{dr}(k-1) \\ &\quad - [ \phi_{dr}(k) - \hat{\phi}_{dr}(k) ] \hat{\phi}_{qr}(k-1) + \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (24)$$

추정속도를 이용한 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (25)$$

### 5. 시스템의 성능결과

그림 4는 0.1[sec]에 1,800[rpm]으로 운전 중, 0.5[sec]에서 0.8[sec]에 부하토크를 5[N.m] 인가하였을 때 응답특성을 나타낸다. 그림 4(a)는 HBPI, PI 제어기의 지령속도와 추정속도, 그림 4(b), (c)는 HBPI 제어기에 의해서 제어되는  $k_p$ 와  $k_i$ 를 나타내고 그림 4(d)는 q축 전류를 나타낸다. 그림 5는 그림 4의 과도상태 부분을 명확하게 분석하기 위하여 확대하여 해석한 결과이다. 그림 5(a)는 속도 상승부분을 나타내며, 그림 5(b)는 부하 변화부분을 나타낸다. 본 논문에서 제시한

HBPI 제어기가 종래의 PI제어기에 비하여 오버슈트가 작고 안정화 시간이 빠르게 나타나고 있다. 그림 6은 1,800[rpm]과 -1,800[rpm]으로 정·역 운전하였을 경우 응답특성을 나타낸다. 정·역으로 운전하였을 경우에도 본 논문에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 PI 제어기에 비하여 속도가 빠르게 상승하고 있으며 발생토크도 크게 발생하고 있어 우수한 응답특성을 나타낸다. 그림 7은 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 PI 제어기, 그림 7(b)는 최대토크 제어, 그림 7(c)는 발생토크, 그림 7(d)는 속도오차를 나타낸다. 그림 7(c)의 발생토크에서 최대토크 제어가 크게 발생하고 있으며, 그림 7(d)의 속도오차에서도 본 논문에서 제시한 최대토크 제어기가 종래의 PI 제어기에 비하여 속도오차가 작게 나타나고 있다.

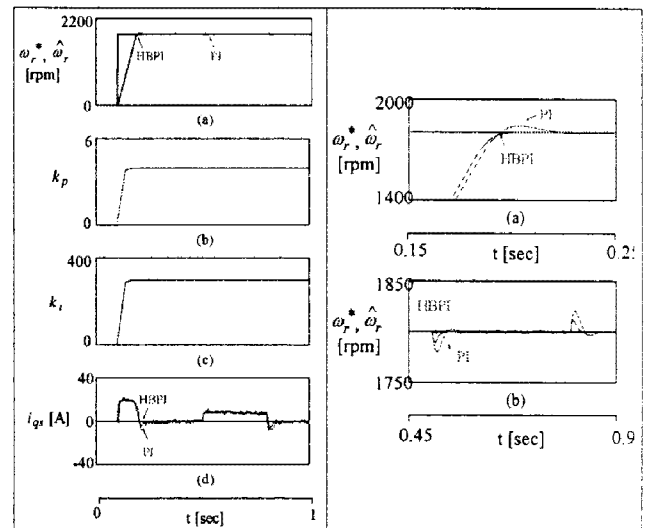


그림 4. 속도 및 부하 변화에 대한 응답특성  
Fig. 4 Response characteristic with command speed and load torque variation

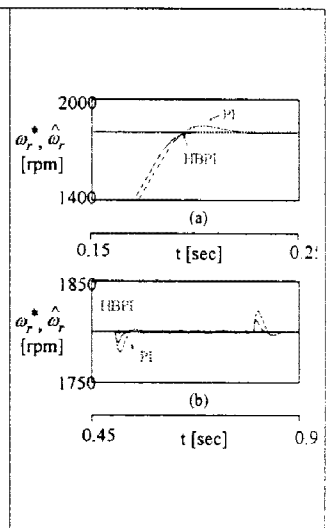


그림 5. 지령속도 및 부하변화에 대한 응답특성  
Fig. 5 Response characteristic with command speed and load torque variation

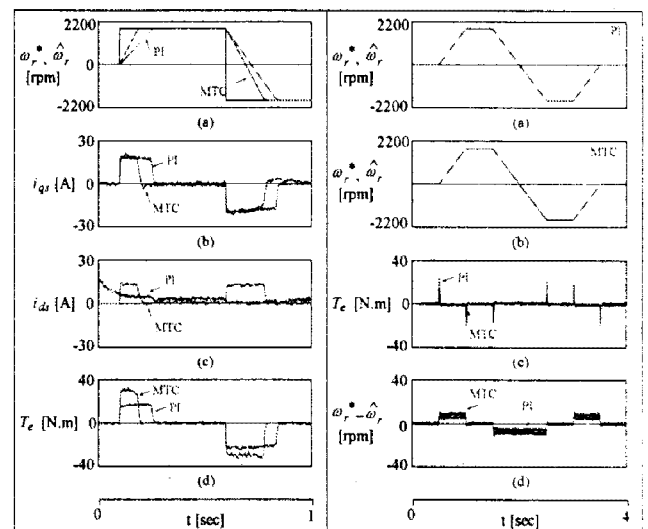


그림 6. 정·역 운전에 대한 최대토크 응답특성  
Fig. 6 Response characteristic maximum torque control with forward and reverse operation

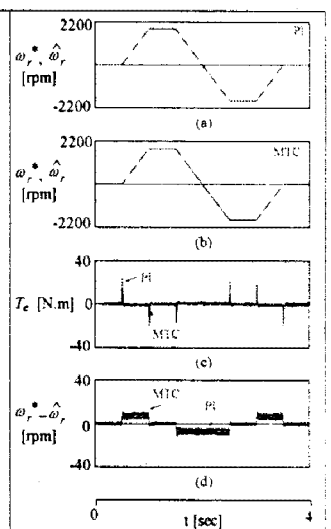


그림 7. 4상한 운전에 대한 최대토크 응답특성  
Fig. 7 Response characteristic of maximum torque control with quadrant drive

그림 8은 속도추정에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 8(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 8(b)는 지령속도와 추정속도, 그림 8(c)는 q축 전류, 그림 8(d)는 속도

추정오차를 나타낸다. 그림 8(d)의 추정오차가 1% 이내로 매우 양호하게 추정하고 있다. 그림 9와 10은 지령 속도 및 부하변화에 대한 전류 응답특성을 나타낸다. 그림 9는 PI 제어기에 의한 전류 응답특성을 나타내고, 그림 10은 본 논문에서 제시한 HBPI제어기에 의한 전류 응답특성을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 추정속도, 그림(b)는 지령 a상 전류, 그림(c)는 실제 a상 전류, (d)는 a상 전류 오차이며, (e)는 스위칭 시간을 나타낸다. 그림(d)의 전류오차에서 본 논문에서 제시한 HBPI 제어기는 종래의 PI 제어기에 비하여 전류오차가 현저하게 작게 나타나고 있어 우수한 성능을 나타낸다.

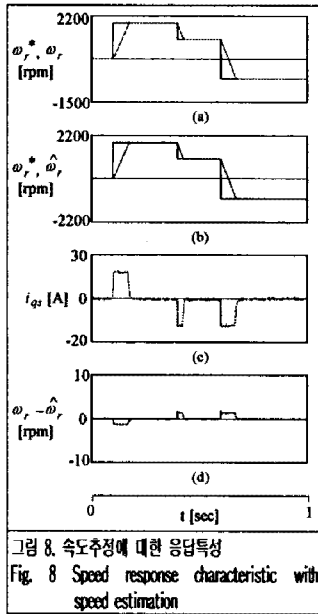


그림 8. 속도추정에 대한 응답특성  
Fig. 8 Speed response characteristic with speed estimation

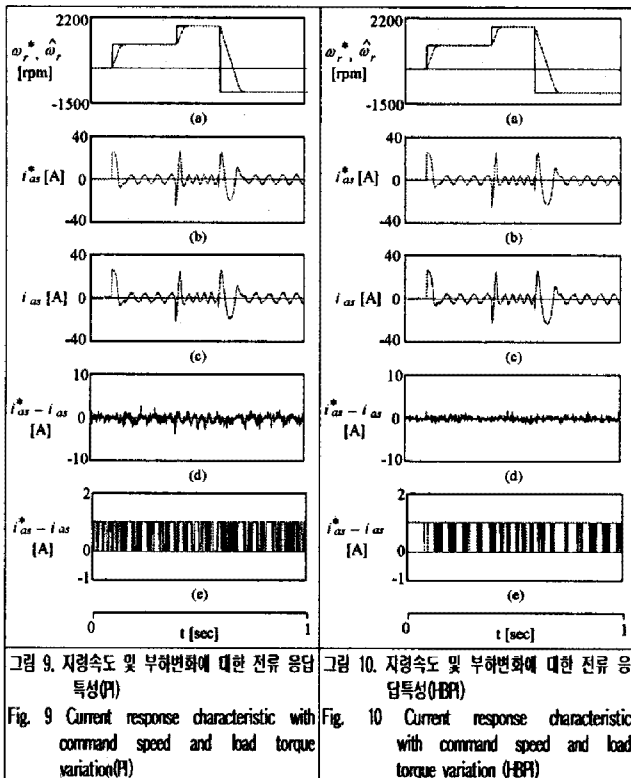


그림 9. 지령속도 및 부하변화에 대한 전류 응답 특성(PI)  
Fig. 9 Current response characteristic with command speed and load torque variation(PI)

그림 10. 지령속도 및 부하변화에 대한 전류 응답 특성(HBPI)  
Fig. 10 Current response characteristic with command speed and load torque variation (HBPI)

## 6. 결론

본 논문은 HBPI 제어기를 이용하여 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어를 제시하였다. HBPI 제어기는 퍼지제어와 적응제어를 혼합한 FAM(Fuzzy Adaptation Mechanism)을 통해 전동기 동작상태에 따라 PI 제어기의 이득값을 자동으로 계산한다. 또한 본 논문에서는 전동기 동작상태에 따라 최적의 슬립주파수를 계산하고 슬립주파수를 이용하여 최대토크 제어를 위한  $d, q$  축 전류를 계산한다. 계산된  $d, q$  축 전류를 통해 최대토크 제어를 수행한다. 본 논문에서 제시한 HBPI 제어기는 유도전동기에 적용하여 정상상태, 과도상태, 속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 최대토크제어가 종래의 PI 제어기 보다 우수한 성능을 얻을 수 있으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] H. Grotstollen and J. Wiesing, "Torque capability and control of a saturated induction motor over a wide range of flux weakening," IEEE Trans. IE, vol. 42, pp. 374-381, 1995.
- [2] J. S. Choi, J. S. Ko and D. H. Chung, "Hybrid artificial intelligent control for speed control of induction motor," ICCAS '06, TPA-6, 2006.
- [3] D. H. Chung, et al., "Development of hybrid artificial intelligent controller for high performance of induction motor," ICEE '06, pp. 101, 2006.
- [4] J. S. Ko, J. S. Choi, J. H. Lee and D. H. Chung, "High Performance of Induction Motor with Adaptive Artificial Intelligent controller," Proceeding of ICMATE'06, Session B1, pp. 189-194, 2006.
- [5] J. C. Lee, H. G. Lee, Y. S. Lee, S. M. Nam and D. H. Chung, "Speed estimation and control of induction motor drive using hybrid intelligent control," International Conference ICPE'04, no. 3, pp. 181-185, 2004.
- [6] J. C. Lee, H. G. Lee, S. M. Nam and D. H. Chung, "Speed control of induction motor drive using adaptive FNN controller," International Conference ICEMS'04, Conference no. FI-5(430-M09-052), 2004. [CD no. 2]