

# 최소분산제어이론을 이용한 유도전동기의 속도제어

(Speed Control of Induction Motor using Minimum Variance Control Theory)

吳元錫\* · 申泰賢\*\*

(Won-Seok Oh · Tae-Hyun Shin)

## 要 約

본 연구는 부하변동이 잦은 유도 전동기 속도제어 시스템에 적합한 최소분산제어 알고리즘을 제안하고 구현을 위한 실제적인 파라미터 추정방법을 제안한다. 그리고 고속 연산 신호처리용 프로세서인 TMS 320C25를 이용한 제어 시스템을 구성한다. 적응식은 선택적 망각인자를 갖는 순환형 최소자승법이 실제적 구현의 관점에서 언급되며, 일반적인 망각인자 알고리즘과 비교분석한다. 제어식은 최소분산제어 알고리즘으로 한다. 제어시스템은 알고리즘의 적용이 용이하도록 PC에 기초한 DSP제어 시스템으로 설계 제작한다. 시뮬레이션과 실험을 통하여, 본 연구의 최소분산제어 시스템이 부하변동에 강인한 구조를 갖고 있으며 유도전동기 제어에 실제적 구현이 가능함을 입증한다.

## Abstract

In this paper, a minimum variance control system is proposed and practically implemented, which is adequate to the induction motor speed control system with frequent load variation. Minimum variance control method is used as a control law and recursive least square method with selective forgetting factor is proposed and analyzed with general forgetting algorithm as an estimation method. Designed control system is based on PC-DSP structure for the purposed of easiness of applying adaptive algorithm. Through computer simulation and experimental results, it is verified that proposed control system is robust to the load variation and practical implementation is possible.

## 1. 서 론

산업설비에 필수적인 고성능 유도전동기 제어에 관한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다.<sup>1)</sup> 특

히, 모델기준적용제어, 자기동조제어, 가변구조제어, 칼만필터, Fuzzy, Neural 등 최신의 현대제어이론들을 도입한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 이 연구들의 초점은 일반 선형제어기가 갖는 문제점들을 최소화하여 시스템 파라미터의 변동과 시변외란에 기인하는 출력오차를 허용범위로 줄여 신속하고 진동이 없는 응답특성을 얻는

\*正會員：柳韓專門大學 電氣科 助教授  
 \*\*正會員：柳韓專門大學 電氣科 副教授  
 接受日字：1996年 5月 20日

것이다.

이러한 연구 중 자기동조제어이론은 공정제어 분야등 산업제어응용에 폭넓게 사용되어 왔으며<sup>2)~5)</sup>, 크게 두가지 제어방식으로 나눌 수 있다. 즉, 최적제어 개념을 도입한 최소분산 제어와 고정제어이론에 기초하여 선형제어기로도 분류되는 극배치제어이다<sup>6)</sup>.

최소분산제어방식은 시스템의 오차항과 제어 입력항으로 구성된 평가함수를 최소로 하도록 제어를 설계하는데 제어가 비교적 간단하고 구현하기가 용이하며 최적의 제어를 할 수 있는 특성을 가지고 있으나, 제어입력이 급변하고<sup>7)</sup> 특히 비최소 위상시스템에 적용되었을 때, 오차항과 제어 입력항 사이의 가중치에 따라서 불안정해질 수 있다는 단점이 있다<sup>8)</sup>. 극배치 제어 방법은 시스템설계자가 시스템의 페루프 이득을 안정된 극점으로 배치하는 것으로 알맞은 극점선정에 유의해야 한다.

본 연구는 유도전동기의 고성능 운전을 위하여, 부하 변동에 강인한 적응제어 시스템 구현을 목적으로 한다. 유도전동기 시스템에 적합한 최소분산제어 알고리즘을 제안하고 그의 실제적 구현을 위하여, 디지털 신호처리용 프로세서를 이용한 제어 시스템을 구성한다.

실제시스템의 강인한 제어를 위해서는 적응적의 파라미터 추정능력이 중요한 요소이므로 기존의 파라미터 추정기를 보완하여 유도전동기 시스템에 적합한 적응치를 제안한다.

제어책은 최소분산 제어방식을 도입하였고, 갑작스런 제어입력 변동을 보상하기 위하여 2스텝의 제어입력차를 평가요소로 한다. 또한 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 출력오차의 적분항을 평가함수에 포함하고<sup>9)</sup>, 부하변동을 파라미터의 변동으로 표현하여 추정된 파라미터로 제어기의 이득을 보상할 수 있게 된다. 적응책은 일반적인 순환형 최소자승법이 특정값을 추정한 후, 파라미터가 다시 변동하면 추정능력이 떨어지는 등, 실제 전동기 제어 시스템에 적절하지 않으므로 가변 망각인자<sup>10)</sup>와 공분산 리셋팅<sup>11)</sup>방법 그리고 선택적망각인자 방법<sup>12)</sup> 등을 고려하여 유도전동기 시스템에 적절하고 안정되며 추정능력이 우

수한 파라미터 추정자를 제안한다. 적응제어를 실제 구현하기 위해서는 방대한 연산을 수행해야 하므로, 프로세서로 TMS320C25 DSP를 이용한다. 고가의 emulation 장비없이 제어시스템을 구현하기 위해 PC에 기초한 DSP 제어시스템을 설계하여 PC에서 프로그램을 개발, 디버깅, 모니터링을 하게 하고 제어 프로그램을 공유 메모리로 다운로드하여 DSP에서 제어 프로그램이 실행되도록 하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 본 연구에서 구현된 유도전동기 속도제어 시스템의 타당성을 입증한다.

## 2. 제어 알고리즘

본 연구에서 제어하고자 하는 부하변동이나 기타 외란에 영향을 받는 시스템에 대한 수학적 모델은 식(1)과 같은 확률적인 단 입력, 단 출력 ARMAX(autoregressive moving average model with auxiliary input)모델로 표현할 수 있다.<sup>13)</sup>

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\omega(t) \quad (1)$$

여기서  $\{y(t)\}$ 와  $\{u(t)\}$ 는 시스템의 출력과 입력이고  $\omega(t)$ 는 무상관 백색 잡음(uncorrelated white noise sequence)이고,  $t$ 는 샘플링 순간( $t=1, 2, 3, \dots$ ),  $q^{-1}$ 는 단위 시간 지연 연산자로서  $q^{-d}y(t) = y(t-d)$ 가 되며,  $d(d \geq 1, \text{정수})$ 는 시스템의 시간지연을 나타낸다.  $A, B$ 와  $C$ 는  $q^{-1}$ 의 다항식이고 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \\ B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}; b_0 \neq 0 \quad (2)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_lq^{-l}$$

상수  $n, m, l$ 은 다항식  $A, B, C$ 의 차수이고 이 차수와  $d$ 를 알면 모델 파라미터들은 파라미터 추정법으로 구할 수 있다. 본 연구에서 적용한 적응 최소 분산 제어기(MVC: Minimum Variance Controller)는 시스템 실제 출력과 기준 출력과의 평균제곱오차(mean square error)를 최소화하는 제어입력을 구하는 최소 분산 제어기와 시스템의 파라미터를 추정하는 순환형 최소 자승 추정기를 합한 제어기이며 일반적으로 자기동조제어기(Self Tuning Regulator)로 불린다. 유도전동기 속도 제어 시스템에 적합한 최

소분산제어기를 설계하기 위하여 식 (3)과 같은 평가함수를 정의한다.

$$J(u, t) = E\{[y(t+d) - y_{ref}(t+d)]^2 + \rho_u [Ru(t)]^2 + \rho_v [\nu_e(t+d)]^2\} = E\{\zeta(t)\} \quad (3)$$

여기에서  $E\{\cdot\}$ 는 샘플링 순간  $t$ 에서 얻어진 값에 의한 샘플링 순간  $t+d$ 에서의 기대값을 나타내고,  $y_{ref}(t)$ 는 기준 궤적을 나타낸다. 강인한 제어 성능을 갖게 하기 위해 제어 루프에 추적오차의 적분항인  $\nu_e(t)$ 를 포함하였고<sup>9)</sup>,  $\nu_e(t)$ 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\nu_e(t) = \nu_e(t-1) + e(t) \quad (4)$$

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (5)$$

그러므로, 평가 함수를 최소화함으로써 시스템 응답과 기준 궤적의 오차를 최소화할 수 있다.  $\rho_u$ ,  $\rho_v$ 는 제어 입력의 크기와 시스템 응답의 정밀도 사이의 가중치를 선택하기 위한 인자들이다. 그리고, 제어 입력  $u(t)$ 의 갑작스런 변동을 제한하기 위해  $R$ 을 식 (6)과 같이 하였다.

$$R = 1 - q^{-1} \quad (6)$$

시간  $t$ 에서  $\zeta(t)$ 를 최소화하면  $J(u, t)$ 가 최소화되므로  $\zeta(t)$ 를 제어입력에 대하여 미분하여  $\zeta(t)$ 를 만족하는 제어입력  $u(t)$ 를 구한다.

### 3. 시스템의 수학적 모델

본 연구에서는 부하시스템을 M-G(Motor-Generator)시스템으로 구성하였다. 유도전동기 부하토크 방정식은 식 (7)이 된다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (7)$$

여기서,  $\omega_r$ 은 각속도,  $P$ 는 극수,  $J$ 는 MG시스템의 관성,  $T_e$ 와  $T_L$ 은 각각 전동기의 발생토크와 부하토크이다. 또한, 동기속도로 회전하는 좌표계에서 발생토크는 식 (8)로 표현할 수 있다.<sup>11)</sup>

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \frac{L_m}{L_r} I_{qs}^* \psi_{dr} \quad (8)$$

여기서  $L_m$ ,  $L_r$ 은 각각 자화 인덕턴스와 회전자 인덕턴스이고  $I_{qs}^*$ ,  $\psi_{dr}$ 은 고정자 q축 전류와 회전자 d축 쇠교자속이다. 식 (7)을 샘플링 시간( $T_s$ )이 매우 적다고 가정하여 일차 홀더로 이산화시키면 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_r(t+1) - \omega_r(t)}{T_s} = \frac{1}{J} (K_e \cdot I_{qs}(t)) - \frac{P}{2J} T_L \quad (9)$$

여기서,  $K_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}$ 이다.

부하토크항은 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_L = K_L \omega_r(t) \quad (10)$$

여기서,  $K_L$ 은 부하용 발전기의 상수이다.<sup>5)</sup>

식 (9)와 식 (10)을 정리하면 식 (11)이 된다.

$$y(t+1) = \theta^T \varphi(t) + \omega(t) \quad (11)$$

여기서

$$y(t+1) = \omega_r(t+1) \quad (12)$$

$$\varphi^T(t) = [-\omega_r(t), I_{qs}(t)] \quad (13)$$

$$\theta^T(t) = \left[ \frac{PK_L T_s}{2J} - 1, \frac{PK_e T_s}{2J} \right] = [a_1, b_0] \quad (14)$$

식 (11)의  $\omega(t)$ 는 백색잡음의 외란이다.  $y(t+1)$ 은 시간  $t$ 에서의 one-step-ahead predictor의 성격을 갖는다.<sup>12)</sup> 식 (11)은 ARMAX 모델인 식 (1), 식 (2)에 기초하여 보면  $n=1, m=0$ 인 경우와 같으며 노이즈 레벨을 나타내는  $l$ 의 값과 시간지연  $d$ 는 실제 시스템의 모델 응답에 따라 선택해야 하는데 본 연구에서는  $l=0, d=1$ 로 선정하였다. 식 (14)를 보면 부하토크 변동 뿐만 아니라 관성의 변동등도 합하여 파라미터로 추정됨을 알 수 있다. 식 (1)의 제어 입력  $u(t)$ 는  $I_{qs}(t)$ 이므로 식 (3)을 최소화하는 제어입력  $I_{qs}(t)$ 를 구하면 식 (15)와 같다.

$$I_{qs}(t) = \frac{1}{b_0^2(1+\rho_u) + \rho_u} [(1+\rho_u)b_0 a_1 y(t) + \rho_u I_{qs}(t-1) + (1+\rho_u)b_0 y_{ref}(t+1) + b_0 \rho_v \nu_e(t)] \quad (15)$$

이 제어기에는 입출력 오차를 보상할 적분항과 비례항이 포함되어 있으며 정제환 루프와 입력치의 급격한 변화를 방지하는 항이 포함되어 있다. 그러므로, 제안된 제어기는 빠른 과도 응답과 부하변동시 신속하고 안정된 회복 능력을 갖게 된다.

식 (15)에서 보는 바와 같이 유도전동기 제어기의 파라미터는 관성과 부하토크등의 변화에 의존하며 또한 샘플링 시간에도 의존됨을 알 수 있다. 일반적으로 유도전동기 제어시스템에서는 시스템의 사용분야가 지정되어 있다. 그러므로, 이 파라미터 변동요인들에 의한 파라미터 변화는 일정한 변동범위를 갖게 된다. 이 점은 파라미터를

추정하고자 하는 제어 시스템 구성에 매우 중요한 참고 자료가 된다. 본 연구에서는 각 변동요인, 즉, 샘플링시간이 일정할 때 관성변화와 부하 토크 상수변화에 대한 파라미터 변동한계를 검토하여 파라미터 추정기의 불안정에 따른 추정 파라미터의 드리프트를 제거한다.

#### 4. 강인한 파라미터 추정 알고리즘

##### 4.1 순환형 최소자승 알고리즘

식 (15)와 같이 제어입력은 시스템 파라미터로 구성되며 일반적으로 파라미터를 추정하기 위해서 순환형 최소자승법(RLS: Recursive Least Square method)이 많이 사용된다. 그러나, RLS를 실제 시스템에 적용하는데는 몇가지 문제점이 따르게 된다. 왜냐하면 실제 시스템은 모델링하지 못한 여러 예측할 수 없는 외란이 작용하고 있으며 샘플링 시간간연이 존재하고 샘플된 정보들은 보통, 노이즈 등 오차를 포함하고 있기 때문이다. 이러한 요소들을 극복할 수 있는 방법은 크게 몇가지로 생각해 볼 수 있다.

즉, 예측하지 못한 외란의 영향을 제거하거나 시스템 모델이나 샘플링 주기같은 RLS동정 파라미터들을 알맞게 선정하는 것, 그리고 RLS 동정법의 성능을 개선하는 방법, 즉, 동정자가 파라미터 변동에 신속히 응답하도록 파라미터 추정 속도를 증가시키는 방법, 그리고 공분산 행렬이 발산하는 것을 막아 불안정한 시스템 파라미터 추정을 피하는 방법 등을 고려해야 한다. 적응제어 알고리즘을 실시스템에 적용하기 위해서는 파라미터 추정 알고리즘의 안정성이 가장 문제시되므로, 본 연구에서는 해결 방안으로 제시되어 온 여러 알고리즘, 즉 가변망각인자 알고리즘, 공분산 행렬의 리셋팅 등을 유도 전동기 시스템에 적용하여, 그 타당성을 검토하고 새로운 알고리즘의 도입을 모색하고자 한다. 우선 시변시스템에 사용되어 지는 망각인자를 갖는 RLS알고리즘을 간단히 설명한다.

파라미터 벡터는 식 (16)과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta^T(t) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{na} \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{nb}] \quad (16)$$

그리고, 입력-출력 벡터는 식 (17)이라 정의한다.

$$\phi^T(t) = [-y(t-1) \ \dots \ -y(t-na) \ u(t-b-1) \ \dots \ u(t-b-nb)] \quad (17)$$

최소자승 알고리즘은 식 (18)-식 (20)과 같은 순환형 방정식의 형태로 서술된다.<sup>11)</sup>

$$\theta(t) = \theta(t-1) + k(t)[y(t) - \theta^T(t-1)\phi(t)] \quad (18)$$

$$k(t) = \frac{p(t-1)\phi(t)}{\lambda + \phi^T(t)p(t-1)\phi(t)} \quad (19)$$

$$p(t) = \frac{[1 - k^T(t)\phi(t)] p(t-1)}{\lambda} \quad (20)$$

여기서,  $\lambda$ 는 망각인자로 시변시스템의 알고리즘 추정능력을 높이기 위해 과거의 시스템 입출력정보들 보다 현재의 정보에 더욱 가중을 두기 위한 변수이며,  $0 < \lambda \leq 1$ 이다.

##### 4.2 가변망각인자

망각인자를 부적절하게 사용하면 때때로 공분산 행렬  $p(t)$ 가 '발산'하게 된다.  $p(t)$ 행렬의 발산은 망각인자가 1보다 작고 시스템이 오랜시간 동안 정상상태에서 동작할 때 일어난다. 이를 보완하기 위한 방법으로 가변 망각인자 알고리즘이 제안되었다. 가변망각인자의 사용은 시스템 추정자의 추정 성능을 높이고  $p(t)$ 행렬의 발산을 막는 효과적인 방법이다. Fortescue등(1981)은 망각인자를 식 (21)과 같이 하였다.<sup>10)</sup>

$$\lambda(t) = 1 - \frac{[1 - \phi^T(t-1)k(t)]\varepsilon^2(t)}{\sum_0} \quad (21)$$

여기서  $\varepsilon(t)$ 는 예측 오차이고,  $\sum_0$ 는 미리 선정된 상수이며 식 (22)와 같이 나타낸다.

$$\sum_0 = \sigma^2 N_0 \quad (22)$$

여기서  $\sigma^2$ 는 계통에 관한 정보를 바탕으로 구한 예측 측정 노이즈이다.  $N_0$ 는 메모리 길이에 따라 결정되며 적응속도를 조절한다. 이 방법의 문제점은 시스템 동작중에  $\sigma^2$ 의 정확한 추정이 어렵다는 것이고, 또한  $\sigma^2$ 가 변할 수 있다는 것이다. 그러므로, 예측 측정 노이즈를 정확하게 추정하지 않으면  $p(t)$ 가 발산하거나  $p(t)$ 가 영으로 수렴하는 문제점은 여전히 남게 된다. 그러므로 이 문제점을 해결하기 위하여  $p(t)$ 의 최대한계를 지정해 주어야 하며 또한  $\lambda(t)$ 의 가변 범위 한계, 그리고 파라미터 변동한계 등을 지정해

주어야 한다.

### 4.3 공분산 행렬의 리셋팅

가변망각인자에 관한 연구는 Cordero와 Mayne<sup>14)</sup> 등에 의해서 계속 연구되었다. 그러나 Vogel과 Edgar<sup>15)</sup>는 파라미터 변화가 감지 되었을 때 공분산 행렬에 추가항을 더하고 간단하게 일반적 최소자승법을 사용하는 것이 더 좋다고 제안하였다. 실제적으로 가중인자의 갑작스런 감소는 공분산을 리셋시키므로 Fortescue 등의 결과와 비슷한 결과를 얻게 된다. 이러한 동기에서 Goodwin과 Elliott<sup>11)</sup>는 공분산 행렬을 여러번 리셋하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

공분산 행렬은 식 (23)으로 표현할 수 있다.

$$p(-1) = k_0 I \quad k_0 > 0 \quad (23)$$

$\{Z_s\} = \{t_1, t_2, t_3, \dots\}$ 을 리셋팅이 일어나는 순간이라 할 때  $t \in \{Z_s\}$  일 때는 일반적인 RLS 방정식 (식 (20)의  $\lambda=1$ 인 경우)을 사용하고  $t=t_i \in \{Z_s\}$ 인 경우에는 식 (24)를 적용한다.

$$p(t_i-1) = k_i I \quad (24)$$

여기서  $0 < k_{\min} \leq k_i \leq k_{\max} < \infty$ 이다.

공분산행렬의 리셋팅 방법은 리셋하는 순간의 설정에 따라서 오히려 시스템이 불안정해질 수 있는 문제점이 생기게 된다.

### 4.4 선택적 망각인자법

본 연구에서는 안정된 파라미터 추정자를 구성하기 위하여 선택적 망각인자법을 제안한다.<sup>12)</sup> 앞에서 살펴 본 바와 같이 공분산 행렬은 식 (25)에서 식 (27)의 조건을 만족할때 최적의 조건이 된다.

$$p(t+1 | t) \geq p(t | t) \quad t \geq 0 \quad (25)$$

$$\alpha_{\min} I \leq p(t+1 | t) \leq \alpha_{\max} I \quad t \geq 0 \quad (26)$$

$$\forall t \geq 0, \phi(t) = 0 \text{ 이라면, } p(t+1 | t) \rightarrow \alpha_{\max} I \quad (27)$$

여기서  $p(t | t)$ 와  $p(t+1 | t)$ 는 식 (20)에서 각각  $\lambda=1$ 인 경우와  $\lambda=\lambda(t)$ 인 경우의 공분산행렬의 값이다. 또한  $\alpha_{\min}$ 과  $\alpha_{\max}$ 는 공분산 행렬의 범위에 따라 선택되는 값이고,  $0 < \alpha_{\min} < \alpha_{\max} < \infty$ 이다.

조건 식 (25)는 샘플링 기간 사이에 새로운 정보가 첨가되지 않으면 시스템 파라미터가 불확실

해짐을 의미한다. 조건 식(26)은 발산을 방지하기 위한 p의 상한치와 하한치를 설정하는 것이고 조건 식 (27)은 추정능력이 떨어지는 것을 막기 위해 알고리즘을 지수함수적으로 리셋팅해야 함을 뜻한다.

그러므로 이 조건들을 만족시킬 수 있는 함수  $f(x)$ 를 식 (28)과 같이 정의하고  $f(x)$ 를 구하면,

$$p(t+1 | t) = f(p(t | t)) \quad (28)$$

$f(x)$ 가 아래의 조건을 만족해야 한다. 즉,

$$f(0) = \alpha_{\min} \quad (29)$$

$$f(\alpha_{\max}) = \alpha_{\max} \quad (30)$$

$$0 < x < \alpha_{\max} \text{ 라면 } f(x) > x \quad (31)$$

식 (28)-식 (30)의 가정을 토대로 본 연구에서는  $f(x)$ 의 식은 식 (32)로 제안하였다.

$$f(x) = \begin{cases} x & x > \alpha_{\max} \\ \alpha_{\min} + \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max}^2} x^2, & x \leq \alpha_{\max} \end{cases} \quad (32)$$

단,  $\alpha_{\min} < \alpha_{\max} \leq 2\alpha_{\min}$ 를 만족해야 한다.

따라서, 상응하는 선택적 망각인자는 식 (33)이 된다.

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} 1 & p_{ij}(t | t) \geq \alpha_{\max} \\ p_{ij}(t | t) \left[ \alpha_{\min} + \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max}^2} p_{ij}(t | t) \right]^{-1} & p_{ij}(t | t) < \alpha_{\max} \end{cases} \quad (33)$$

여기서  $i, j$ 는 행렬의 행과 열을 뜻한다. 공분산 행렬의 각 요소를 선택적 망각인자를 통하여 개별적으로 구한다.

## 5. 시뮬레이션 결과

본 연구의 알고리즘을 부록1과 같은 파라미터를 갖는 유도전동기에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. PI 제어기를 사용한 경우와 동작 특성을 비교하였다. 시뮬레이션은 속도가 변동하였을 경우와 부하가 변동하였을 경우로 나누어 수행하였고 그에 따른 시스템의 응답특성을 고찰하였다.

그림 5.1은 본 연구에서 제안한 유도전동기 백터제어 시스템의 전체 블럭선도이다.

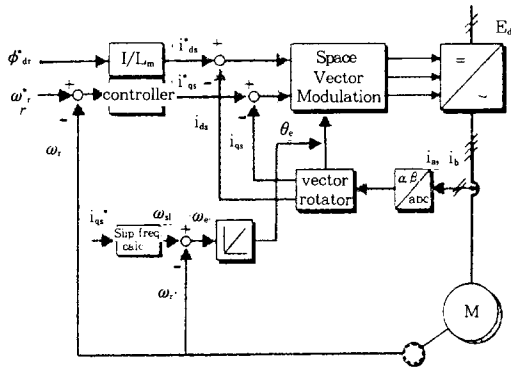


그림 5.1 벡터제어 시스템의 전체 블럭선도  
Fig. 5.1 Overall block diagram of proposed vector control system

속도와 자속의 지령에 따라 속도제어기에 의해 지령 토크 성분 전류  $i_{ds}^*$ 와 지령 슬립각속도  $\omega_{sl}^*$ 이 출력되며,  $\omega_{sl}^*$ 은 검출된 회전자 각속도와 더해져 좌표변환을 위한  $\theta_e$ 가 결정된다. 제안된 제어 알고리즘의 성능비교를 위하여 속도제어기는 PI제어기와 MVC를 사용하여 동작특성을 비교하였다. MVC는 식 (15)로 구성된다. 실제 3상전류를 검출하여 계산된  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  값은 지령 d, q 전류  $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$ 와 비교되며 그 결과를 전류제어기를 통하여 유도전동기를 동작시킨다.

동특성 해석을 위한 3상 농형 유도전동기의 방정식은 식 (34), 식(35), 식(36)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{ds}}{dt} &= V_{ds} - r_{sd} i_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= V_{qs} - r_{sq} i_{qs} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= -r_{rd} i_{ds} - \omega_r \psi_{qs} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= -r_{rq} i_{qs} + \omega_r \psi_{dr} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{pmatrix} L_r \psi_{ds} - L_m \psi_{dr} \\ L_s \psi_{dr} - L_m \psi_{ds} \\ L_s \psi_{qr} - L_m \psi_{qs} \\ L_r \psi_{qs} - L_m \psi_{qr} \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{J} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} T_l \quad (36)$$

본 연구에서 제안한 제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 가변속 운전을 한 경우와 부하를 변동한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 각각의 경우에 대하여 비교대상으로

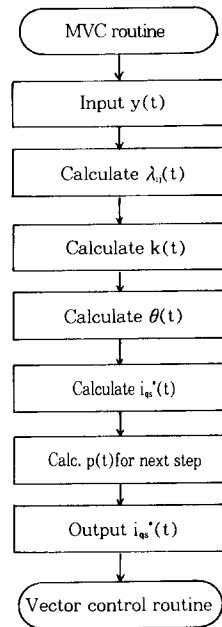


그림 5.2 최소분산제어 알고리즘의 흐름도  
Fig. 5.2 Flow chart of minimum variance control algorithm

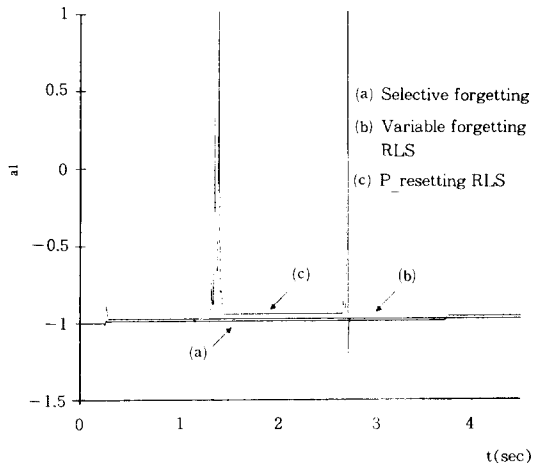
PI 제어기를 선정하였고 여러 파라미터 추정자의 성능을 비교하였다. 그림 5.2는 최소분산제어 알고리즘의 흐름도이다.

### 5.1 가변속 운전의 경우

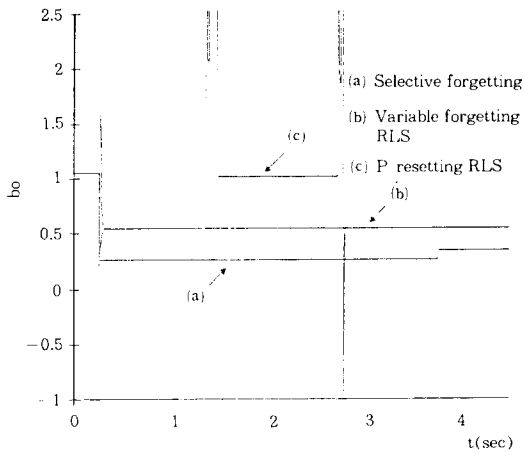
정지 상태에서 150(rad/sec)의 지령속도로 가속 운전과 감속운전을 한 응답특성을 고찰하였다. 부하는 관성 부하로 관성을 약 2배로 증가하였다. 전술한 여러 파라미터 추정자 중에서 본 연구의 시스템 모델에 적합한 파라미터 추정자를 선정하는 것은 매우 중요한 문제이므로 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 가장 제어대상 시스템에 적절한 파라미터 추정자를 선정한다. 그림 5.3은 가변속 운전을 수행하면서 (a) 선택적 망각인자를 갖는 RLS 알고리즘(sf), (b)가변망각인자를 갖는 RLS 알고리즘(vf), (c)공분산 행렬을 리셋하는 RLS 알고리즘(P\_rest)을 적용한 최소분산제어의 경우의 파라미터 추정특성을 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 sf의 경우가 가장 안정되게 시스템 파라미터를 추정함을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 sf 파라미터 추정자를 이용한 최소분산제어 알고리즘

즘 수행 결과를 PI제어기와 비교하여 타당성을 비교하였다.

그림 5.4는 PI제어기와 본 연구의 MVC의 가변속 운전의 경우 특성비교이다. (a)는 속도 응답 특성이고 (b)는 토크 전류 응답특성의 결과이다. 기동시에 MVC의 응답특성이 PI의 경우보다 불량한 특성을 보이거나 파라미터가 추정된 후의 특성은 MVC가 더 양호한 결과를 보이고 있다.

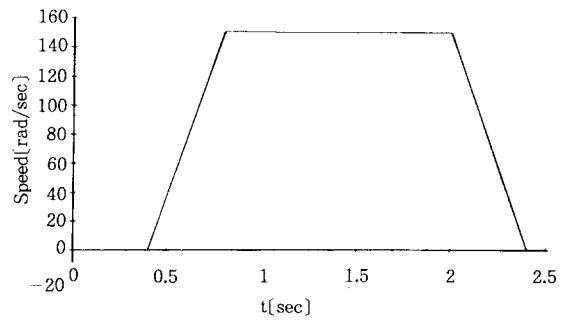


(a) parameter a1

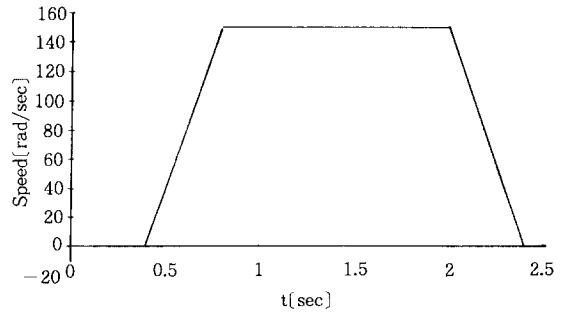


(b) Parameter bo

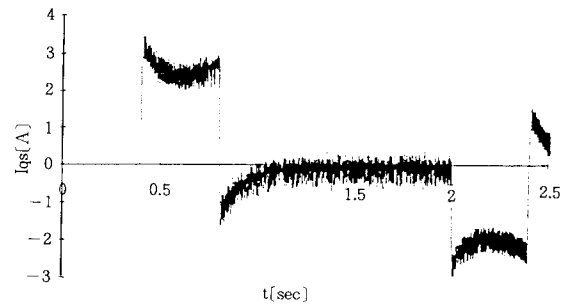
그림 5.3 가변속 운전시 파라미터 추정 특성  
Fig. 5.3 Characteristics of parameter estimation at Variable speed drive



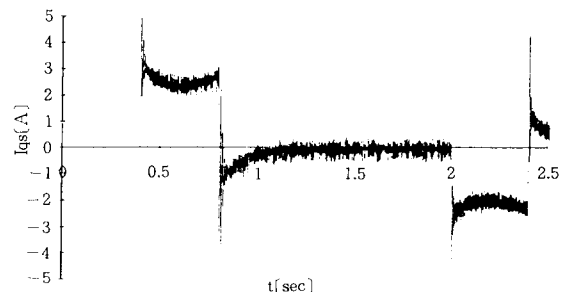
(1) PIC



(2)MVC  
a) Speed response



(1) PIC



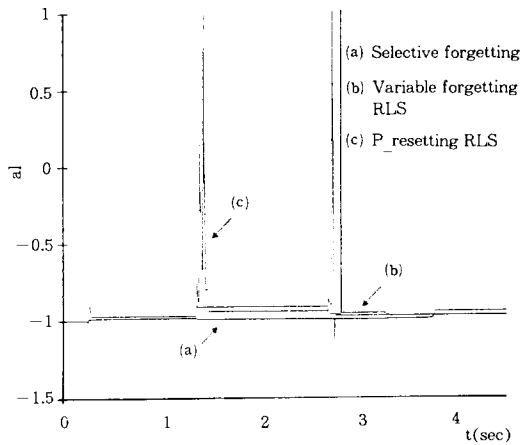
(2)MVC

b) Torque current response

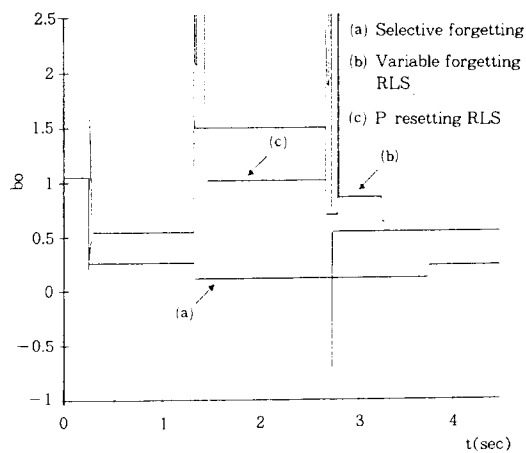
그림 5.4 가변속 운전 응답 (시뮬레이션)  
Fig. 5.4 Response of variable speed drive(simulation)

## 5.2 부하변동의 경우

부하를 변동한 경우의 시뮬레이션 결과를 보인다. 기준속도가 150(rad/sec)인 경우이다. 그림 5.5는 정상상태에서 2.5(Nm)의 일정부하를 인가했을 때 vf, p\_reset 그리고 sf 알고리즘의 파라미터 추정특성을 나타낸 것이다. 부하변동시 sf 알고리즘의 특성이 가장 안정된 동작을 하고 있음을 알 수 있다. 부하변동의 시뮬레이션에서도 sf 알고리즘의 파라미터 추정자를 사용하였다. 그림 5.6은 PI제어기와 본 연구의 MVC의 부하변동 특성 비교이다. 정상상태에서 2.5(Nm)와 2

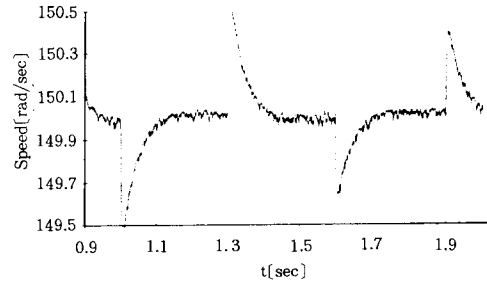


(1) parameter al

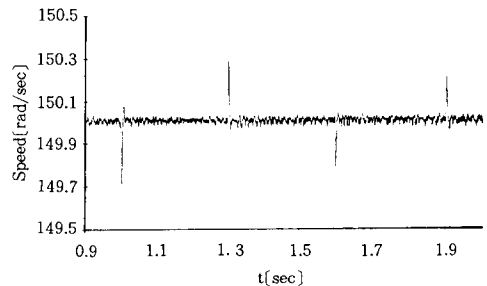


(2) parameter bo

그림 5.5 부하변동시 파라미터 추정 특성  
Fig. 5.5 Characteristics of parameter estimation at Load Variation

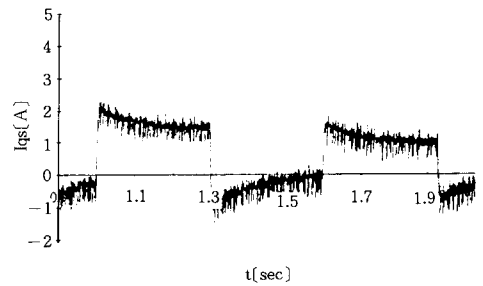


(1) PIC

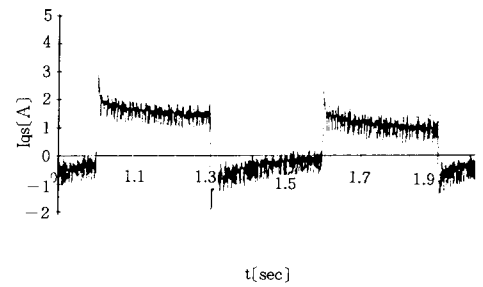


(2) MVC

(a) Speed response



(1) PIC



(2)MVC

(b) Torque current response

그림 5.6 부하변동 응답(시뮬레이션)  
Fig. 5.6 Response of load variation (simulation)



[Nm]의 부하를 인가하였다. (a)는 속도응답 특성이다. 부하변동에 의한 속도변화의 폭이 MVC가 PIC의 50% 정도이고 속도회복시간도 PIC의 10% 정도임을 알 수 있다. 그러므로 MVC가 부하변동에 빠르게 대처함을 알 수 있다. (b)는 토크 전류응답특성이다. 파라미터 추정이 적절히 수행됨에 따라 토크 전류특성이 PI보다 MVC의 경우가 양호함을 확인할 수 있다. 초기 응답특성에 MVC가 PIC보다 높은 피크전류가 흐르는데 그것은 부하 변동시 파라미터를 추정하는 시간동안의 과도특성이라 생각된다. 좀더 샘플링시간을 짧게 한다면 더 양호한 특성을 얻을 수 있으리라 생각된다.

### 6. 실험 결과 및 고찰

본 연구의 적응 제어 알고리즘을 구현하기 위해서 빠른 명령 주기(Instruction Cycle Time)를 갖는 디지털 신호처리용 프로세서인, 명령 주기가 100nsec의 TMS320C25를 이용하였다. 그림 6.1에 실험 시스템 구성도를 나타내고 그림 6.2에 I/O포트의 구성도를 나타내었다. 제작된 DSP보드는 64Kword의 고속 static RAM을 PC(IBM호환기종)와 공유하며, 외부입력 포트에 A/D변환기, 속도 카운터를 갖고 있고 출력포트로

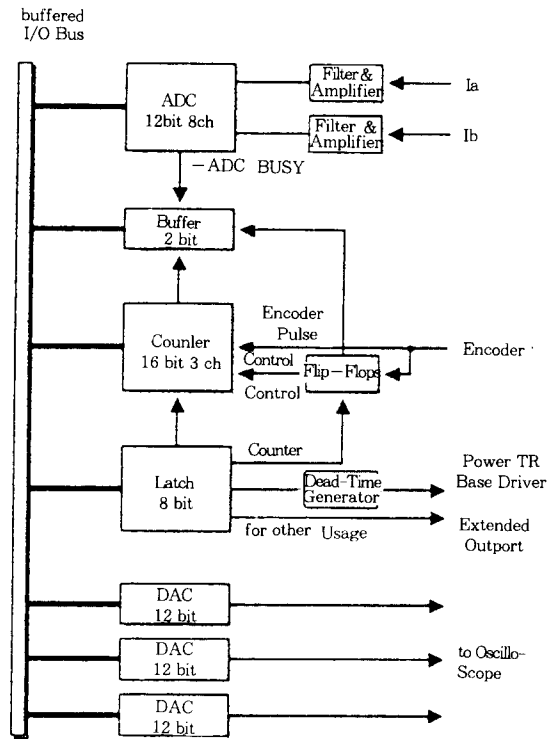


그림 6.2 I/O포트의 구성도  
Fig. 6.2 Configuration of I/O ports

8채널을 갖게 설계하였다. 속도 측정에 사용된 엔코더는 500 펄스를 발생하며, 2채배하여 사용하였다. 또한, 속도측정은 8254 programmable Interval Timer를 이용하였다. 프로그램 작업과 디버깅은 PC에서 수행되며 작업된 프로그램은 공유 RAM 영역으로 down load 되어 DSP가 제어 알고리즘을 실행할 수 있도록 하였다. 알고리즘은 C언어와 어셈블리어로 작성하였다.

실험장치는 MG set로 구성하였고, 부하는 저항기를 사용하였다. 실험에 사용된 전동기의 정격은 부록 1에 나타내었다. 실험과형은 D/A 변환기를 통하여 매 샘플링 순간마다 측정 데이터를 출력하도록 하여 디지털 메모리 스코프로 측정하였다. 샘플링 시간은 200 μsec로 하였다.

#### 6.1 가변속 운전 특성 시험

시뮬레이션과 마찬가지로 정지상태에서 150rad/sec의 지령속도로 가속한 후 다시 감속하

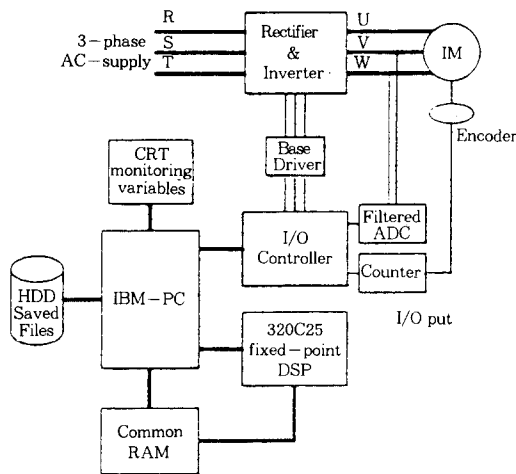


그림 6.1 실험 시스템 구성도  
Fig. 6.1 Configuration of experimental system

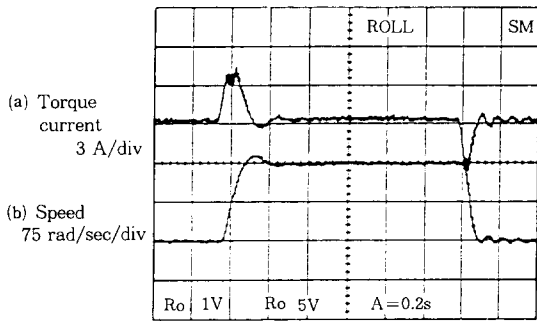


그림 6.3 가변속 운전응답 : PI제어기  
Fig. 6.3 Response of variable speed drive : PI controller

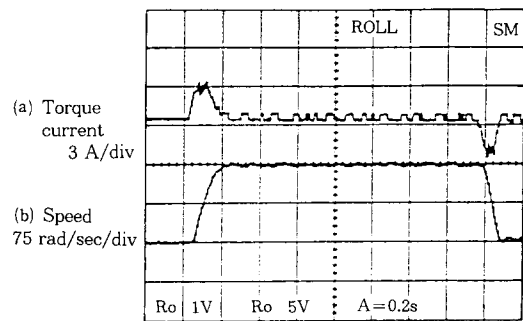


그림 6.4 가변속 운전응답 : MVC  
Fig. 6.4 Response of Variable speed drive : MVC

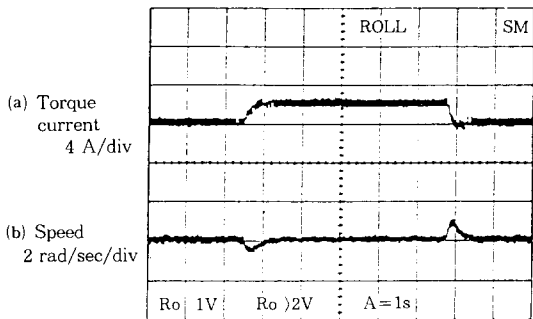


그림 6.5 부하변동응답 : PI제어기  
Fig. 6.5 Response of load variation : PI controller

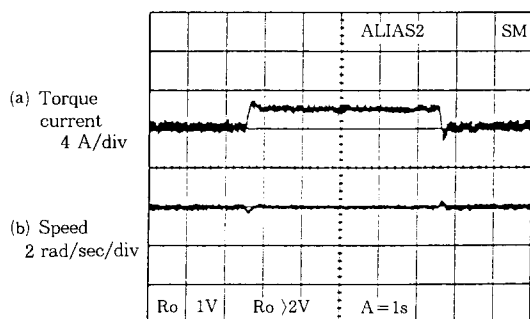


그림 6.6 부하변동응답 : MVC  
Fig. 6.6 Response of load variation : MVC

는 가변속운전 특성을 시험하였다. 그림 6.3은 PIC의 경우의 실험특성이고 그림 6.4는 MVC의 경우이다. 시뮬레이션과 유사하게 MVC의 경우가 빠르게 지령속도에 응답함을 보이고 있다.

## 6.2 부하변동의 경우

기준속도가 150rad/sec인 정상상태에서 부하를 인가하였다. 그림 6.5는 PI제어기의 경우이고 그림 6.6은 MVC의 경우이다. MVC가 PIC 보다 빠른 응답특성을 보이고 있으며 부하변동에 의한 속도변동의 폭도 PIC의 50% 정도임을 알 수 있다. 또한 토크 전류특성도 PI 보다 안정된 응답을 보이고 있으나 초기응답시 PIC보다 높은 피크전류가 나타남을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 유도 전동기의 벡터 제어의 성능 향상을 위하여 부하변동을 보상하는 최소분산 제어 알고리즘을 제안하였다. 제어 알고리즘의 파라미터 추정자가 제어기의 성능을 좌우하므로 전동기 시스템에 적합한 파라미터 추정자를 선정하였다. 부하 모델을 시스템 파라미터로 표현하였고 파라미터를 추정하여 부하변동을 보상하는 제어기를 구성하였다.

최소분산제어를 구현하기 위해서는 빠른 명령 주기를 갖는 고속 프로세서의 도입이 필수적이므로 16bit TMS320C25 DSP를 제어기로 사용하여 벡터 연산 및 적응제어 알고리즘을 수행하도록

하였다. 또한 PC에서 프로그램 개발, 다운로드, 디버깅 및 모니터링 등과 I/O port제어, 즉, 속도와 전류 검출 등을 수행하였다.

시뮬레이션과 실험을 통하여 본 연구의 최소분산제어 알고리즘을 이용한 유도전동기 벡터제어 시스템의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- 1) B. K. Bose, Power Electronic and AC drive, Prentice Hall, 1986.
- 2) Furuta, K., Kosuge, K. and Kobayashi, H., "Self-tuning, sliding mode and adaptive control for direct drive motor," IECON '88, pp.459~465
- 3) S. Kamar Bharadwaj et. al., "Application of self-tuning algorithm to a rolling mill drive," IAS90, pp. 428~434.
- 4) Clark, D.W. and J.P. Gawthrop, "Self-tuning controller," Proc. IEE, Vol. 122(a), 1975, pp.929~934.
- 5) Axel Brickwedde, "Microprocessor based adaptive speed and position control for electrical drives," IAS84, pp.411~417.
- 6) Isermann, R., Lachmann, K.-H and Matko, D., Adaptive control systems, Prentice Hall, 1992, pp. 70~71
- 7) Wellstead, P.E., Edmunfs, J.M., Prager D. and Zanker,P., "Self-tuning pole/zero assignment regulators," INT.J. CONTROL, 1979, Vol. 30, no.1, pp1~26
- 8) Grimble, M., "Generalized Minimum Variance Controller revisited," Optimal Control Application & Methods, 1988, vol. 9, pp.63~77
- 9) Eduard Eitelberg, "A regulating and tracking PI(D) controller," INT. J. CONTROL, Vol. 45, No.1, 1987, pp.91~95.
- 10) T.R.Fortescue, L.S.kershenbaum, B.E. Ydstie, "Implementation of self-tuning regulator with variable forgetting factors," Automatica, V17, 1981, pp.831~835.

- 11) Goodwin,G.C. and H. Elliott, "Deterministic convergence of a self-tuning regulator with covariance resetting," IEE PROC, V130, Pt. D, No. 1, pp.6~8
- 12) Parkum, J. E., et. al., "Selective forgetting in Adaptive Procedures," IFAC90 Estonia, vol.3, pp180~185
- 13) Goodwin, G.C. and K.S. sin, Adaptive Filtering Prediction and Control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.
- 14) Cordero, A.O., and D.Q. Mayne, "Deterministic convergence of a self-tuning regulator with variable forgetting factor," Proc. IEE, Vol.128, Pt.d, No.1,pp.19~23.
- 15) Vogel, E.G. and T.F. Edgar, "Application of an adaptive pole-zero placement controller to chemical process with variable dead time," Am. Control Conf., Washington D. C.

부록 1. 시험된 유도 전동기의 정수

$R_s$ 7.375 $\Omega$	$L_s$ 0.47691(H)	$L_m$ 0.45278(H)	$L_r$ 24.127(mH)
$R_r$ 9.2802 $\Omega$	$L_r$ 0.47691(H)	$L_b$ 24.127(mH)	$J$ 0.013(kgm <sup>2</sup> )

◆ 著 者 紹 介 ◆



오 원 석(吳元錫)

1962년 2월 19일생. 1985년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 유한 전문대 전기과 조교수.



신 태 현(申泰賢)

1939년 3월 6일생. 1964년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 한양대 산업대학원 전기과 졸업. 현재 유한 전문대 전기과 부교수.