

# PI속도제어기에서의 새로운 적분누적 방지기법

論文  
54B-12-9

## New Anti-windup Strategy for PI-type Speed Controller

崔鐘宇<sup>†</sup> · 李尙哲<sup>\*</sup>  
(Jong-Woo Choi · Sang-Cheol Lee)

**Abstract** - This paper proposes a new anti-windup strategy to suppress integrator windup for PI speed controller and to be implemented on the existing system with minimal modification. When the speed control mode is changed from P controller to PI controller, an appropriate initial value for integrator is assigned. This value restricts overshoot and high settling time. Also, the proposed method guarantees the designed performance independent on operating conditions, i.e. different set-point change and load torque. Simulation and experimental results for PMSM speed controller have shown its superior control performance compared with the conditional integration and tracking back calculation.

**Key Words** : Speed Controller, PI Controller, Integrator Windup, Anti-windup, Integrator Initial Value, PMSM

### 1. 서 론

최근 벡터제어 방법이 확립되어 전동기 구동시스템 적용이 산업의 많은 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 생산 제품의 품질과 산업 생산성 향상을 위해 급가감속 및 고성능 속도 제어가 요구되고 있다. 이러한 속도제어 분야의 속도제어기는 현재까지 고전적인 비례적분(PI) 형태의 제어기가 많이 사용된다. PI제어기는 쉬운 구현성과 모델링 오차 등에 비교적 양호한 성능을 보이지만, 적분기 포화에 의한 누적현상에 의해서 오버슈트 및 느린 응답 시간을 갖는 단점이 있다. 심한 경우 응답의 불안정 현상을 유발하여 시스템의 잣은 고장(trip)의 원인이 되기도 한다.

이는 대부분의 산업용 제어시스템들이 제한조건을 가지는 것에서 기인한다. 예를 들어, 전압과 전류제한을 갖는 아날로그 제어기, 완전개방과 완전폐쇄로 한정되는 벨보, 속도한계를 갖는 구동장치, 정격 전압과 정격 전류가 주어진 전력변환기 등이 있다. 이러한 조건을 입력제한(input limitation) 혹은 제어기 포화(saturation)라고 하며, 이로 인해 제어기 출력과 시스템 입력은 다를 수가 있어 선형동작 영역에서 설계된 제어기는 정상적인 동작을 기대하기 힘들다 [1]. 이러한 성능 저하 현상인 적분누적 (integrator windup)은 과도한 지령 혹은 외란 등에 의해서 쉽게 발생한다 [2]. 또한, 구동기에 연결된 여러 개의 제어기가 조건에 따라 변경되거나 혹은 어느 한 제어기가 수동모드로 전환(substitution)되어 동작하게 될 경우도 적분 누적이 발생할 수 있다 [3].

적분누적이 전체제어 시스템에 미치는 영향을 단계적으로 살펴보면, 포화된 제어기는 더 이상의 입력을 시스템에 가할 수가 없게 되며, 시스템 응답성의 향상없이 적분기는 오차를 계속해서 누적해 아주 큰 값을 갖게 된다. 반면에 적분기를 정상상태로 되돌리 위해서는 반대 부호의 오차를 상당시간 동안 가져주어야 하므로 큰 오버슈트(overshoot)와 긴 수렴시간을 초래하여 우수한 특성을 갖는 제어기를 설계하기 위해서는 반드시 적분누적 방지(anti-windup) 기법을 포함한 제어기를 구현하여야 한다 [4,1].

전통적으로 아날로그 제어기 설계에서 적분누적 현상을 해소하는 기법들은 최근 디지털 제어기가 상용화되면서 새로운 관점에서 접근하려는 노력이 이루어지고 있다 [4]. 그리고, 적분누적 방지기법에 대한 개념이 제어기설계 시 기본 고려 사항으로 다수의 저서에 제시되고 있으며 최근에 적분누적 방지기법 설계에 대해 일반적 해석 틀이 제시되어 이론적인 관점에서 매우 유용한 지침이 되고 있다 [5].

이러한 문제를 해결하기 위해 기존에 적분누적 방지에 대해 수많은 연구가 이루어 졌다 [6,1,3,12]. 하지만 응답속도가 저연되거나 응답에 오버슈트가 생기는 것은 아직 남아 있다. 적분누적 문제를 해결하기 위한 접근은 이론적인 관점에서 비선형 시스템이론을 기반으로 하여 전체시스템을 한꺼번에 설계할 수 있으나 복잡하며 간편한 구현이 최대의 장점인 비례적분제어기 설계관점과 일치하지 않는다 [7]. 그래서 적분누적 문제를 다루는 원칙적인 접근은 먼저 비선형성을 무시한 채 제어기를 설계한 후, 적분누적 등의 비선형성을 고려하여 성능저하를 해소하기 위한 보상기를 추가하는 것이 일반적이다 [7]. 기본적으로 적분누적 방지기법은 조건적분(conditional integration)과 추적역계산(tracking back calculation)이 대표적이다 [4]. 조건적분 기법은 특정조건의 만족 여부에 따라 적분기를 동작시키거나 일정값으로 유지시킨다. 추적역계산 기법은 제어기 출력값의 포화전과 후 값의 차이를 적절한 이득을 끌어하여 적분기에 궤환하는 구조를 갖는다. 이

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 慶北大學 電氣工學科 助教授 · 工博  
E-mail : jwchoi@ee.knu.ac.kr

\* 正會員 : 慶北大學 電氣工學科 博士後研修 · 工博  
接受日字 : 2005年 10月 7日  
最終完了 : 2005年 10月 27日

구조는 조건적분 기법과 함께 구현되어 통합제어 틀(unified or hybrid framework)을 제공하기도 한다 [6,8]. 이때 제어기에 사용되는 특정 상태 변수를 관측기를 통해서 추정하기도 한다 [9].

본 논문에서는 오버슈트가 전혀 없으며 빠른 응답시간을 가지면서, 기존의 비례적분 제어기에 쉽게 구현되는 것을 특징으로 하는 새로운 적분누적 방지 제어기를 제안한다. 2장에서 기존에 널리 사용되는 조건적분과 추적역계산 방법을 설명하며 이를 통해 단점을 살펴본다. 3장과 4장에서 초기값을 고려하여 전체시스템의 전달함수를 구하고, 이를 근거로 하여 최상의 응답성능을 위한 이득설정과 초기값을 체계적으로 계산한다. 5장에서는 영구자석 동기전동기를 대상으로 한 모의 실험과 실제실험을 행하여 기존의 적분누적 방지기법들과 상호비교를 통하여 새롭게 제안한 방법의 우수성을 확인한다.

## 2. 기존의 적분누적 방지기법들

새롭게 제안한 방법의 우수현재 PI 속도제어기에서 많이 사용되는 적분누적 방지기법은 4가지로 요약된다. 조건적분 방식은 제어기가 포화가 되고 오차가 제어신호와 같은 부호를 가지는 경우에 적분기는 동작하지 않고 비례제어기만으로 동작된다 [8]. 제한적분 방식은 고이득값으로 궤환하게 되면 구동기는 설정한 선형 영역에서만 동작되어 적분누적으로 인한 문제가 발생되지 않는다 [10]. 추적역계산 방식은 포화되기 전의 값과 포화된 후의 값의 차이에 이득을 곱한 양 만큼 적분량을 줄여주어 적분누적이 발생되지 않도록 한다 [4]. 그리고, 위에 언급한 방법을 적절하게 조합하여 사용하는 통합형 적분누적 방지기법이 있다 [1,2]. [1]의 경우는 적분기 이외에 미분기와 비례제어기에도 적절한 제한을 두어 좀더 안정적인 궤환 신호를 발생시킨다. 반면에 [2]의 경우는 특정 조건이 만족되면 적분기로 입력되어지는 궤환신호가 스위치의 조작으로 특정값으로 치환된다. 위에서 설명한 4가지의 방법은 조건적분과 추적역계산 기법을 기본으로 하여 구성되므로 아래에서 이를 설명한다.

### 2.1 조건적분(Conditional integration)

그림 1의 조건적분 기법의 구조에서 보여지듯이 특정조건에서 적분기가 온 혹은 오프가 되며, 정상상태 오차를 영으로 제어하기 위해서는 반드시 적분기가 온이 되어야 한다. 조건을 선정하는 다양한 방법이 제시되었으며 [6,11], 조건이 만족되면 일정값을 유지한다고 하여 적분기 클램핑(integrator clamping)이라고 불린다. 일반적으로 제어기가 포화되는 시점( $i \neq i^*$ )에서 오차신호와 제어입력 신호가 동일한 부호( $\Delta\omega_m \times i > 0$ )를 가지는 경우에 적분기가 동작을 멈추고 적분기 출력값은 이전 상태 값으로 유지된다. 그러나, 모든 영역에서 원만한 제어특성을 만족하는 적분기의 온 혹은 오프를 선택하는 운전 패턴을 결정하기가 매우 어렵다.

### 2.2 추적역계산(Tracking back calculation)

추적역계산 기법은 적분누적을 해결하는 고전적인 방법으로 여겨진다. 일반적으로 널리 사용되는 구조는 그림 2에 나타내었으며,  $K_a$ 는 적분누적방지 궤환이득이라 한다. 제어기

포화가 발생하면 포화된 양에 따라 궤환이득이 곱해져서 적분기 입력값을 줄여주게 되나, 운전조건에 따라 달라지는 단점이 있다. 여기서 포화값은 구동기의 출력을 측정할 수도 있고, 포화모델을 제어기에서 표현할 수도 있다. 그럼 3에 나타낸 데드존(dead zone)을 가지는 구조는 큰 이득에 대해서 제어기의 출력신호를 구동기 포화가 일어나지 않는 영역으로 제한할 수 있다. 여기서 데드존을 포화 최대최소값으로 하고, 기울기를 궤환이득으로 하면 추적역계산 구조와 유사해진다.

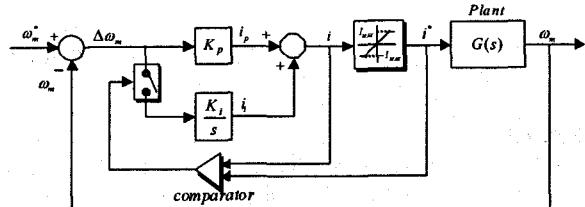


그림 1. 조건적분 적분누적방지 제어기 블록도

Fig. 1 Conditional integration scheme block diagram

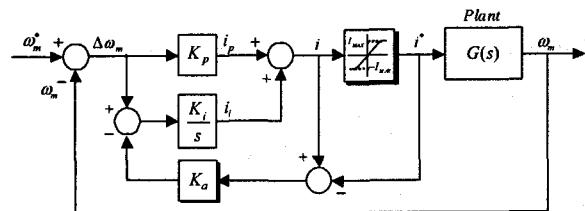


그림 2. 추적역계산 적분누적방지 제어기 블록도

Fig. 2 Tracking back calculation scheme block diagram

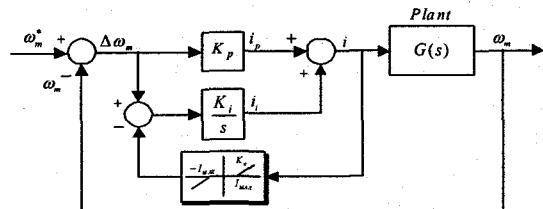


그림 3. 적분제한 적분누적방지 제어기 블록도

Fig. 3 Dead zone scheme block diagram

## 3. 제안된 적분누적 방지기법

### 3.1 동작원리

새롭게 제안되는 적분누적 방지 제어기는 기존에 제시된 조건적분 보상기법의 특징인 비례제어와 비례적분제어 전환을 이용한다. 그러나, 비례제어에서 비례적분제어 영역으로 전환되어 동작할 때에 적정한 초기치를 설정하여 오버슈트가 없는 응답특성을 갖도록 하는 것을 특징으로 하고 있다. 제안된 적분누적 방지기법은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

속도지령에 대해 제한기에 의해 포화가 계속되는 순간까지 비례 제어모드로 동작을 하다가 포화가 끝나는 순간 비례적분 제어모드로 전환한다. 비례 제어모드가 시작되는 시점의 적분값을  $i_t(t_a)$ 이라고 하고, 비례 제어모드가 시작되기 전 비례적분 제어모드에서 마찰에 의한 성분을 포함한 부하토크가 적절히 적분기에 의해 보상되어 정상상태 오차가 없게 제어되고 있다고 가정한다.

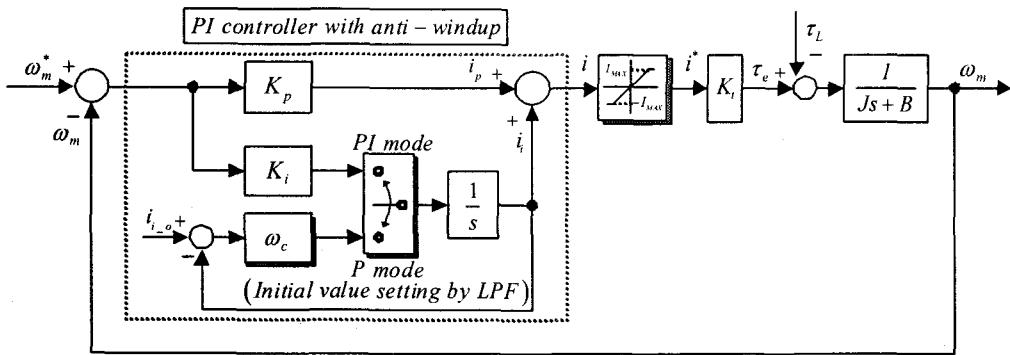


그림 4. 제안된 적분누적 방지 비례적분 속도제어기 블록도

Fig. 4 The proposed anti-windup PI speed controller block diagram

제어기가 포화된 후 비례 제어모드에서는 적분기의 출력 값을  $i_i(t_a)$ 에서 적정값  $i_i(t_b)$ 로 변경한다. 이때 적분기 출력의 갑작스런 변화를 방지하기 위하여 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하였으며, 필터의 시정수를 조정하여 비례적분 제어모드로 전환되기 전에 적분기의 초기값이  $i_i(t_b)$ 가 되도록 한다. 그림 5는 계단입력에 대한 속도응답 및 적분기 출력 값의 변화를 나타내었다.

여기서,  $J$ 는 관성,  $B$ 는 마찰계수,  $K_t$ 는 토크상수이다. 비례적분 제어모드에서 동작할 경우에 비례이득  $K_p$ 과 적분이득  $K_i$ 에 대해서 제어기를 미분 방정식으로 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} i(t) &= i_p(t) + i_i(t) \\ i_p(t) &= K_p(\omega_m^*(t) - \omega_m(t)), \quad \frac{di_i(t)}{dt} = K_i(\omega_m^*(t) - \omega_m(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\omega_m^*(t)$ 는 각속도 지령값이며,  $i_p(t)$ 와  $i_i(t)$ 는 각각 비례적분 제어기의 비례항과 적분항을 나타낸다. 위 (1)과 (2)로부터 제어기가 포화되는 시점 즉,  $t=t_b$ 에서 초기값을 고려한 라플라스 변환을 행한 폐루프 전달함수를 구하면 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} J(s\omega_m(s) - \omega_{m\_o}) + B\omega_m(s) \\ = K_t \left[ \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\omega_m^*(s) - \omega_m(s)) + \frac{i_{i\_o}}{s} \right] - \frac{\tau_L}{s} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 비례적분 제어모드로 전환된 시점에서 속도의 초기값을  $\omega_m(t_b) = \omega_{m\_o}$ 로, 적분기 출력의 초기값을  $i_i(t_b) = i_{i\_o}$ 로 표현한다. 그리고,  $\omega_m(s)$ 과  $\omega_m^*(s)$ 은 각각  $\omega_m(t)$ 와  $\omega_m^*(t)$ 의 라플라스 변환값으로 정의하며, 부하 토크는 일정하다고 가정한다. (3)의 관계식을 각각의 입력성분에 대해 다시 정리하면 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \omega_m(s) &= \frac{K_t(K_p s + K_i)}{J s^2 + (K_t K_p + B)s + K_t K_i} \omega_m^*(s) - \frac{1}{J s^2 + (K_t K_p + B)s + K_t K_i} \tau_L \\ &\quad + \frac{J s}{J s^2 + (K_t K_p + B)s + K_t K_i} \omega_{m\_o} + \frac{K_t}{J s^2 + (K_t K_p + B)s + K_t K_i} i_{i\_o} \end{aligned} \quad (4)$$

정상상태로 제어되고 있는  $t=t_a$ 에서 부하토크와 마찰에 의한 전류를 보상하였다가 가정할 수 있으며, 이때의 속도전류를 각각  $\omega_m(t_a) = \omega_{m\_ss}$ 과  $i_i(t_a) = i_{i\_ss}$ 으로 나타낸다. 비례적분 제어기가 동작을 시작하는 시점  $t=t_b$ 에서의 적분기의 초기값은 다음과 같은 관계를 가지는 것으로 설정한다.

$$i_{i\_o} = -K(\omega_m^* - \omega_{m\_o}) + i_{i\_ss} + \frac{B}{K_t}(\omega_{m\_o} - \omega_{m\_ss}) \quad (5)$$

여기서,  $K$ 는 임의의 상수이며, 적분누적 방지 제어기의

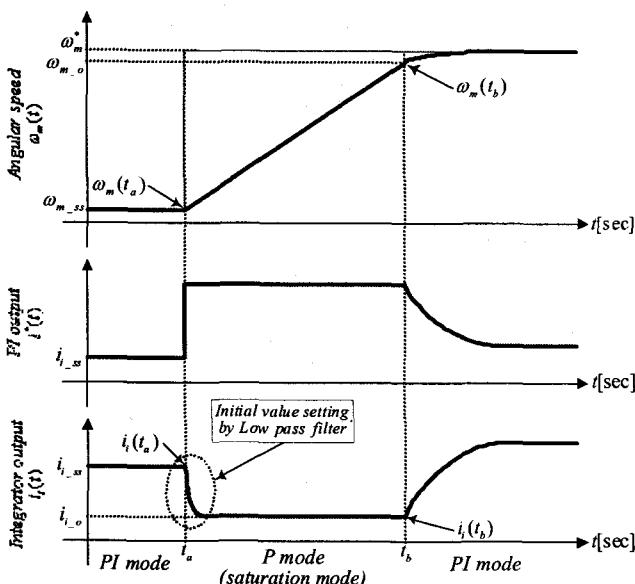


그림 5. 계단 속도지령에 대한 속도응답 및 적분기 출력 값의 변화

Fig. 5 Angular speed response at step command, PI output, and integrator value changes

### 3.2 초기값을 고려한 폐루프 전달함수

$\omega_m(t)$ 은 전동기의 각속도,  $\tau_L$ 는 부하 토크이며, 그리고  $i(t)$ 는 토크 발생전류로 정의하면, 기계시스템을 표현하는 미분방정식은 (1)과 같다.

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t) = K_t i(t) - \tau_L \quad (1)$$

이득을 설정하는 변수가 된다. 그리고, 비례 제어 모드로 동작하기 전에 비례적분 제어기가 부하 토크를 충분하게 보상하였다고 하면 이전의 정상상태 즉,  $t = t_a$  시점에서의 적분항의 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{ss} = \frac{\tau_L + B\omega_{m\_ss}}{K_i} \quad (6)$$

(6)을 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$i_o = -K(\omega_m^* - \omega_{m\_o}) + \frac{\tau_L + B\omega_{m\_o}}{K_i} \quad (7)$$

다음으로 (7)을 (4)에 대입하여 정리하면 비례적분 동작영역에서의 속도 초기값을 고려한 전달함수를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_m(s) &= \frac{K_i[(K_p - K)s + K_i]}{Js^2 + (K_i K_p + B)s + K_i K_i} \omega_m^*(s) \\ &+ \frac{Js + K_i K + B}{Js^2 + (K_i K_p + B)s + K_i K_i} \omega_{m\_o} \end{aligned} \quad (8)$$

이를 비례적분 제어기가 동작하는 구간 동안의 응답특성을 나타내는 전달함수로 다시 표현하면 (9)와 같이 된다.

$$\omega_m(s) - \frac{\omega_{m\_o}}{s} = H(s) \left( \omega_m^*(s) - \frac{\omega_{m\_o}}{s} \right) \quad (9)$$

여기서,  $H(s) = \frac{K_i[(K_p - K)s + K_i]}{Js^2 + (K_i K_p + B)s + K_i K_i}$  이다. 이는 초기값을 영으로 하여 구한 전달함수와 비교하면 시스템 영점이 설계상수  $K$ 가 포함된 형태로 변경되었음을 알 수 있다.

#### 4. 적분누적방지 제어기 설계

##### 4.1 영점과 극점 배치 및 이득 설정

(9)는 비례적분 제어영역에서 속도지령에 대한 속도의 응답 특성을 표현하는 것으로 이득  $K$ 를 조절하면 전달함수의 영점을 조정하여 응답특성을 바꿀 수 있다는 것을 의미한다. 전달함수 (9)는 다음과 같은 2개의 극점  $p_1, p_2$  와 1개의 영점  $z_1$ 을 가진다고 가정하면, (10)과 같이 기술할 수 있다.

$$H(s) = -\frac{p_1 p_2}{z_1} \frac{(s - z_1)}{(s - p_1)(s - p_2)} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} z_1 &= -\frac{K_i}{K_p - K} < 0, \\ p_1 &= \frac{-(K_i K_p + B) + \sqrt{(K_i K_p + B)^2 - 4 J K_i K_i}}{2 J} < 0, \\ p_2 &= \frac{-(K_i K_p + B) - \sqrt{(K_i K_p + B)^2 - 4 J K_i K_i}}{2 J} < 0. \end{aligned}$$

극점은 PI 제어기에 의해 결정 되어지며, 영점은 PI 제어기 외에 별도의 설계상수  $K$ 에 의한 이득설정이 가능하다. 예를 들어 2개의 극점 ( $|p_1| < |p_2|$ ) 중 응답이 늦은 극점과 영점이 상쇄되게 즉,  $z_1 = p_1$ 으로 영점 설정을 하면, 설계변수  $K$ 는 (11)과 같이 된다.

$$K = K_p + \frac{K_i}{p_1} \quad (11)$$

위의 이득에서는 (10)은 극점과 영점이 제거되고 1개의 극점으로 표현된다.

$$H(s) = \frac{-p_2}{s - p_2} \quad (12)$$

위 식은 1차 저역통과 전달함수로 속도응답이 오버슈트가 없다는 것을 의미한다. 만약  $K$  값을 위에서 정한 값보다 작게 설정하게 되면 속도응답에는 오버슈트가 발생하게 되고, 크게 설정하게 되면 속도 응답은 느려지게 된다.

##### 4.2. 적분초기값 설정

비례적분 제어모드로 전환될 때의 속도 초기값과 적분기 초기값을 구하기 위하여 비례 제어모드에서 비례적분 제어모드로 전환되는 시점에서의 관계식을 이용한다. 비례제어 영역에서의 전류 지령치는 비례 제어 값과 적분초기치의 합이 전류 제한 값과 일치하게 된다.

$$K_p(\omega_m^* - \omega_{m\_o}) + i_{ss} = \pm I_{max} \quad (13)$$

여기서 양의 방향으로 포화될 경우 '+'를, 음의 방향으로 포화될 경우 '-'를 취한다. (5)와 (13)을 이용하여 적분 초기값과 비례적분 제어 영역으로 전환되는 시점의 속도 초기값을 구할 수 있다.

$$i_{ss} = \begin{cases} \frac{K_p(\tau_L + B\omega_m^*) - (K_i K + B)I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i \geq 0 \\ \frac{K_p(\tau_L + B\omega_m^*) + (K_i K + B)I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (14)$$

또한, 부하 토크를 정상상태로 제어되고 있는 전류성분 즉,  $\tau_L = K_i i_{ss} - B\omega_{m\_ss}$  으로 표현하면 (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$i_{ss} = \begin{cases} \frac{K_p(K_i i_{ss} + B(\omega_m^* - \omega_{m\_ss})) - (K_i K + B)I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i \geq 0 \\ \frac{K_p(K_i i_{ss} + B(\omega_m^* - \omega_{m\_ss})) + (K_i K + B)I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

일반적으로 전동기는 마찰계수가 적은 값 ( $B \approx 0$ )이거나 부하 토크에 비해 작은 양 ( $B\omega_m \ll \tau_L$ )을 갖는다고 하면, (14)와 (15)는 (16)과 같이 간단하게 정리될 수 있다.

$$i_{ss} \approx \begin{cases} \frac{K_p \frac{\tau_L}{K_i} - K I_{max}}{K_p - K} = \frac{K_p i_{ss} - K I_{max}}{K_p - K} & \text{for } i \geq 0 \\ \frac{K_p \frac{\tau_L}{K_i} + K I_{max}}{K_p - K} = \frac{K_p i_{ss} + K I_{max}}{K_p - K} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (16)$$

포화구간 동안은 비례항에 의한 성분이 제어기의 포화를 이루기에 충분하게 큰 값이며, 충분히 빠른 응답특성을 가지도록 설계된 저역통과 필터 즉,  $LPF = \omega_c / (s + \omega_c)$ 를 사용하여 비례적분 제어영역으로 동작하기 전에 초기전류를 설정한다. 제어기의 포화가 해소되어, 비례적분 제어모드로 전환하는 시점의 속도를 구하면 (17) 혹은 (18)과 같다.

$$\omega_{m_o} = \begin{cases} \frac{K_i(K_p - K)\omega_m^* + \tau_L - K_i I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i \geq 0 \\ \frac{K_i(K_p - K)\omega_m^* + \tau_L + K_i I_{max}}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (17)$$

혹은,

$$\omega_{m_o} = \begin{cases} \frac{K_i(K_p - K)\omega_m^* - B\omega_{m_ss} + K_i(i_{ss} - I_{max})}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i \geq 0 \\ \frac{K_i(K_p - K)\omega_m^* - B\omega_{m_ss} + K_i(i_{ss} + I_{max})}{K_i(K_p - K) - B} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

또한, 일반적으로 전동기는 마찰계수가 적은 값 ( $B \approx 0$ )이거나 부하토크에 비해 작은 양 ( $B\omega_m \ll \tau_L$ )을 갖는다고 하면, (17)과 (18)은 (19)과 같이 간단하게 정리될 수 있다.

$$\omega_{m_o} \approx \begin{cases} \omega_m^* + \frac{\tau_L - K_i I_{max}}{K_i(K_p - K)} = \omega_m^* + \frac{i_{ss} - I_{max}}{K_p - K} & \text{for } i \geq 0 \\ \omega_m^* + \frac{\tau_L + K_i I_{max}}{K_i(K_p - K)} = \omega_m^* + \frac{i_{ss} + I_{max}}{K_p - K} & \text{for } i < 0 \end{cases} \quad (19)$$

## 5. 모의실험 및 실험결과

모의실험은 실제 실험 시에 사용될 표1의 400[W] 영구자석 동기전동기를 대상으로 하였으며, 널리 사용되는 Matlab/Simulink상에서 구현되었다.

표 1. 영구자석 동기전동기의 정격 및 성수

Table 1. Ratings and parameters of permanent magnet synchronous motor

정격 출력	400[W]
정격 전류( $i$ )	2.89[A]
토크 상수( $K_t$ )	0.3252[Nm/A]
관성( $J$ )	$3.21 \times 10^{-3}[kgm^2]$
마찰계수( $B$ )	$\approx 0$

속도제어용의 비례적분제어기의 비례이득은  $K_p = J \times \omega_{sc}$ 이고, 적분이득은  $K_i = K_p \times \omega_{sc_i}$ 으로 설정하였다. 여기서  $\omega_{sc_i} = \omega_{sc}/5$ 이며, 주파수 대역은  $\omega_{sc} = 500[rad/s]$ 로 설정하였다. 즉,  $K_p = 0.049$ ,  $K_i = 4.93$ 이 된다. 여기서, 시스템의 극점은 각각  $p_1 = -138.2$ ,  $p_2 = -361.8$ 이 된다. 추적역계산 적분누적 방지기법에서 포화되는 정도를 궤환하는데 곱해지는 이득은  $K_a = 2/K_p = 40.6$ 이다. 그리고, 조건적분 적분누적 방지기법은 제어기의 포화가 발생하면 이전 상태로 적분기 출력값을 유지하면서 비례모드로 동작하게 하였다. 제안된 적분누적 방지기법에서 극점과 영점을 상쇄하는 이득은  $K = 0.0136$ 이다. 그림 6은 전체 실험 구성도이며, 매  $100\mu s$ 마다 제어를 수행하고 PWM 파를 발생하였다. 전류제어기의 주파수 대역은  $5000[rad/s]$ 으로 속도제어기의 10배정도로 빠른 응답을 보이게 선정하여 제어기 상호간섭이 최소가 되도록 하였다.

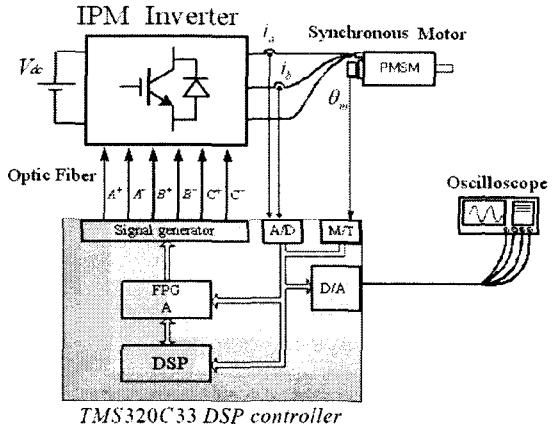


그림 6. 실험장치 구성도

Fig. 6 Experimental system setup

### 5.1 기존 비례적분 제어기의 적분누적 현상

그림 7은 속도지령이  $+1000[rpm] \leftrightarrow -1000[rpm]$ 의 값으로 스텝으로 변화하는 무부하에서 비례적분 속도제어기 만을 사용한 속도 제어 응답 특성을 보여준다. 무부하 조건의 그림 7(a)와 비교해서 그림(b)의 50% 부하가 있는 경우에 전류제한 현상이 더 심하여 적분누적이 심각한 영향을 보임을 알 수 있다. 동일한 제어기의 이득 설정에서도 50%에서 80%로 오버슈트가 증가하였으며, 가감속시 각기 다른 응답 특성을 가짐을 보여준다. 그림 7(c)는 무부하 조건에서의 실험결과를 보여주며, 모의실험결과와 거의 일치함을 확인하였다.

### 5.2 영점과 극점 배치 및 이득 설정

그림 8은 속도지령이  $+1000[rpm] \leftrightarrow -1000[rpm]$ 의 값으로 스텝으로 변화하는 무부하에서 각기 다른 적분누적 방지 케이스에 대한 속도제어기의 응답과 적분기 출력값을 보여준다. 그림 8(b)의 이득  $K$ 에서는 극점과 영점이 상쇄가 되는 경우로 오버슈트가 없게 되며, 그림 8(a)와 그림 8(c)와 같이 각각 -50%로 작거나 +50%로 큰 이득에서는 오버슈트나 언드슈트를 보이게 된다. 그래서 실제 적용에서는 약간의 오버슈트를 허용하면서 빠른 응답특성을 보이도록 적정 이득을  $0.85 \times K$ 로 설정하였다.

### 5.3 영점과 극점 배치 및 이득 설정

그림 9는 속도지령이  $+1000[rpm] \leftrightarrow -1000[rpm]$ 의 값으로 스텝으로 변화하는 무부하에서 적분누적 방지기법을 가진 비례적분 속도제어기의 응답 특성을 보여준다. 그림 7(a)의 비례적분제어기 만을 사용한 경우와 비교하면 각각 그림 9(a)과 그림 9(b)의 추적역계산과 조건적분 기법이 사용되면 적분누적이 상당부분 해소되어 오버슈트 감소로 이어져 안정적인 제어특성을 보여준다. 이와 비교해서 그림 9(c)의 새롭게 제안된 적분누적 방지기법의 경우 오버슈트가 거의 나타나지 않았고 응답성이 가장 우수하였다.

그림 10은 50% 부하시 비례적분 속도제어기의 응답 특성을 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)의 무부하시와 비교하면 그림 10(a)와 그림 10(b)의 기존 적분누적 방지기법들의 경

우 속도응답 특성에 변화가 발생하였다. 그림 10(a)의 추적 역계산 기법의 경우 가속시에는 개선된 응답성을 보여주나, 감속시에는 응답성이 현저하게 나빠진다. 이는 운전조건에 따라 동일한 응답특성을 기대하기 어려운 것을 의미하며, 시행착오에 의해 이득을 선정해야 되는 문제점이 있다. 그림 10(b)의 조건적분 기법에서는 이득설정의 번거로움은 없으

나 이 역시 가감속시 다른 응답성을 보인다. 그러나, 그림 10(c)의 세롭게 제안된 적분누적 방지기법에 의한 경우는 무부하에서와 동일한 이득설정에서도 오버슈트가 거의 나타나지 않았고 우수한 응답 특성을 항상 유지하였다.

그림 11은 무부하에서의 실험결과이며, 그림 9의 모의실험결과와 비교하여 유사한 결과를 보임을 확인하였다.

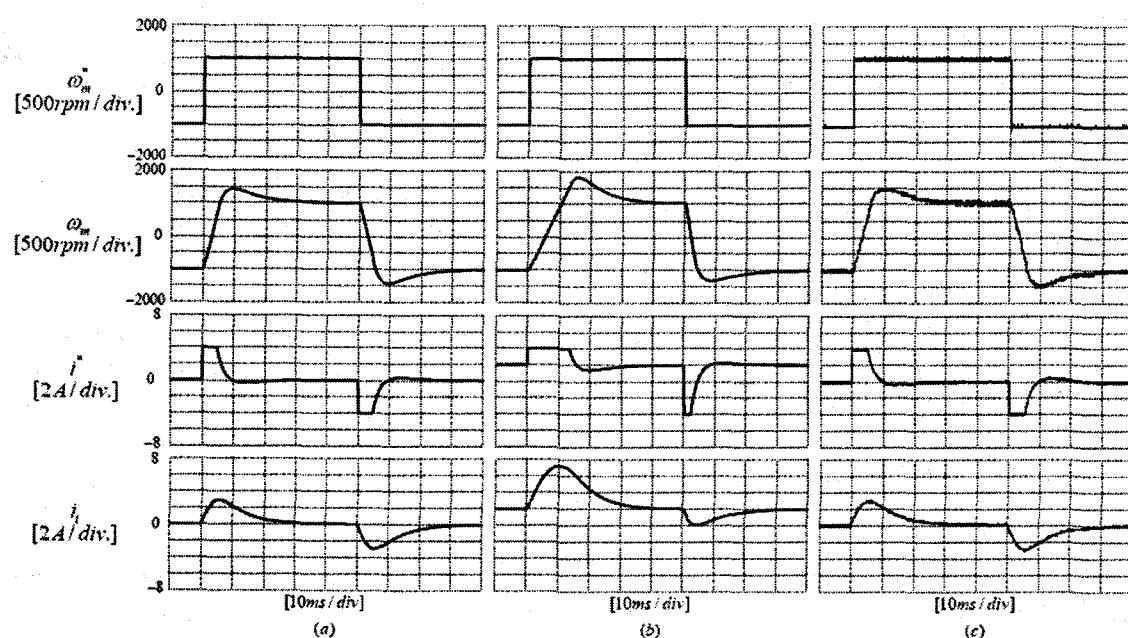


그림 7. 비례적분 속도제어기 응답 특성 비교 : (a) 무부하, (b) 50% 부하에서의 모의실험결과와 (c) 무부하에서의 실험결과  
(상단부터 : 속도지령, 속도응답, 전류지령값, 적분기 출력값)

Fig. 7 Speed responses with conventional PI controller : simulation results at (a) no load, (b) 50% load, and experimental results at (c) no load (From the top : speed reference, speed response, current command, integrator output)

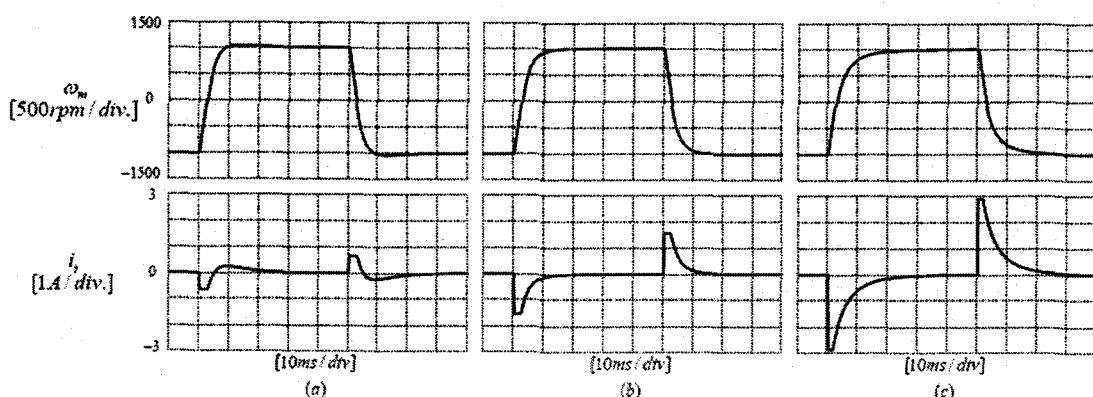


그림 8. 이득  $K$ 의 변화에 따른 속도제어기 응답 특성 (a)  $0.5 \times K$ , (b)  $K$ , (c)  $1.5 \times K$  : 모의실험결과  
(상단 : 계단속도지령에 대한 속도응답, 하단: 적분기 출력값)

Fig. 8 Simulation results for speed responses with different anti-windup gains : (a)  $0.5 \times K$ , (b)  $K$ , and (c)  $1.5 \times K$   
(Top: speed response for step command, bottom : integrator output)

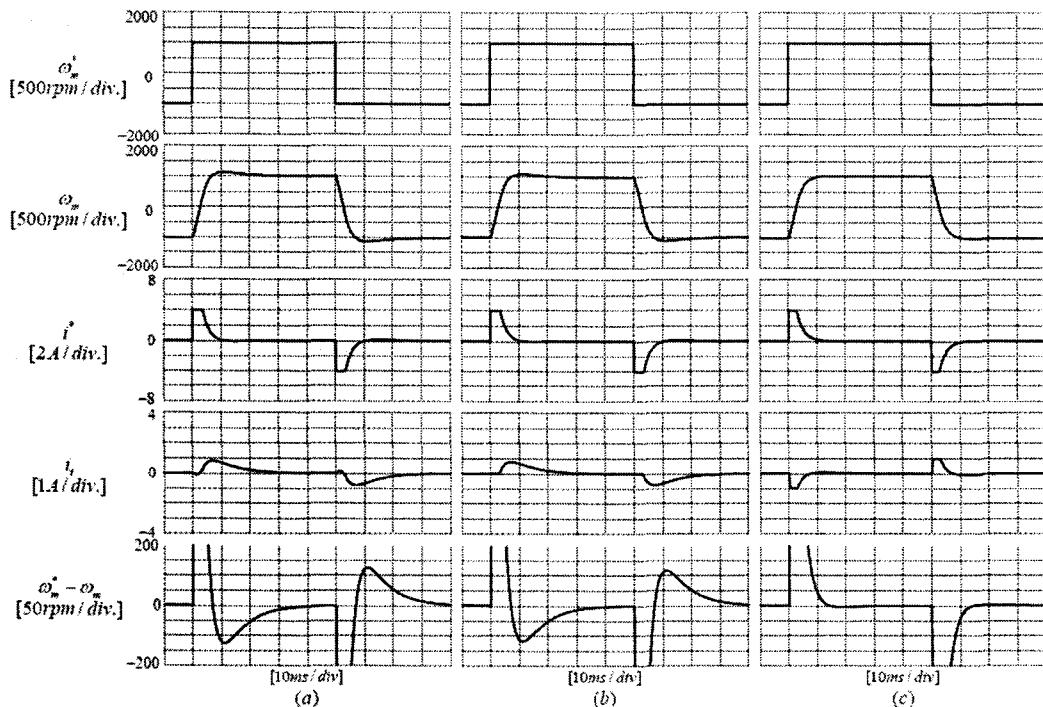


그림 9. 무부하에서의 적분누적 방지기법 비교 (a) 추적역계산, (b) 조건적분, (c) 제안된 적분누적 방지기법 : 모의실험결과  
(상단부터 : 속도지령, 속도응답, 전류지령값, 적분기 출력값, 속도오차)

Fig. 9 Simulation results for speed responses at no load with (a) tracking back calculation, (b) conditional integration, and (c) the proposed anti-windup scheme (From the top : speed reference, speed response, current command, integrator output, speed error)



그림 10. 50%부하에서의 적분누적 방지기법 비교 (a) 추적역계산, (b) 조건적분, (c) 제안된 적분누적 방지기법 : 모의실험결과  
(상단부터 : 속도지령, 속도응답, 전류지령값, 적분기 출력값, 속도오차)

Fig. 10 Simulation results for speed responses at 50% load with (a) tracking back calculation, (b) conditional integration, and (c) the proposed anti-windup scheme (From the top : speed reference, speed response, current command, integrator output, speed error)

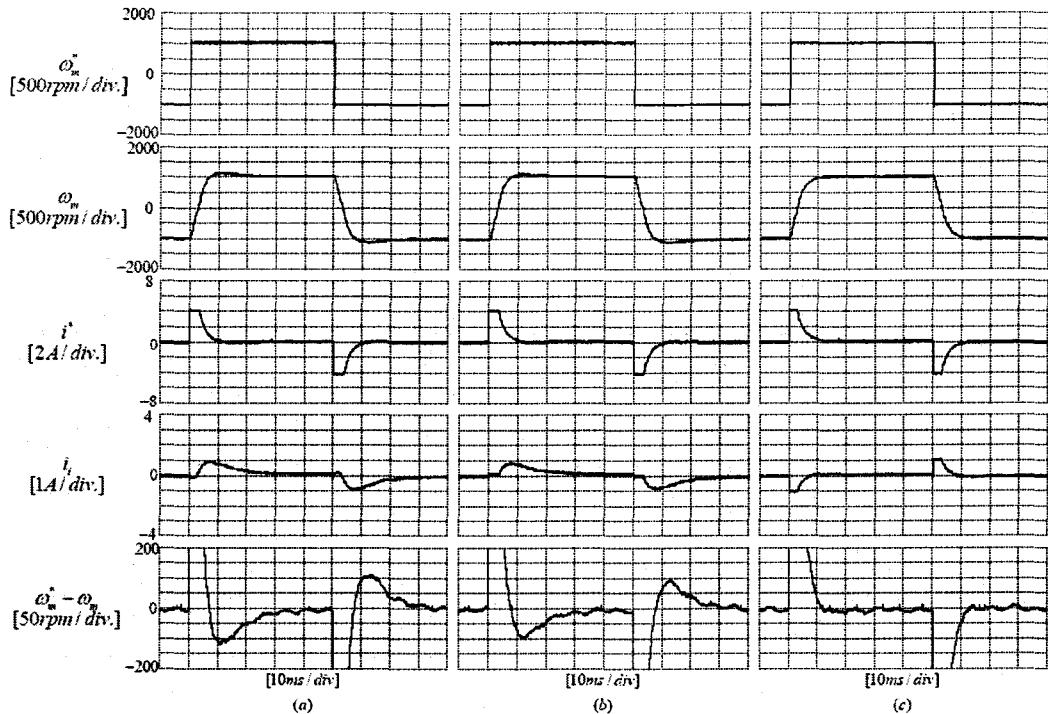


그림 11. 무부하에서의 적분누적 방지기법 비교 (a) 추적역계산, (b) 조건적분, (c) 제안된 적분누적 방지기법 : 실험결과  
(상단부터 : 속도지령, 속도응답, 전류지령값, 적분기 출력값, 속도오차)

Fig. 11 Experimental results for speed responses at no load with (a) tracking back calculation, (b) conditional integration, and (c) the proposed anti-windup scheme (From the top : speed reference, speed response, current command, integrator output, speed error)

## 6. 결 론

본 논문에서는 비례적분 속도제어기의 새로운 적분누적 방지기법을 제안하였다. 제어기의 포화가 해소되는 시점에서 속도와 전류의 초기값을 고려한 전달함수를 유도하였고, 이를 근거로 속도제어 응답의 오버슈트가 전혀 발생하지 않는 영점과 극점 상쇄방법을 제시하였다. 또한, 비례적분제어기에서 비례제어(P) 모드와 비례적분(PI) 제어모드로 전환되는 시점에서 부하조건, 전류제한값, 속도제어기 이득 등을 고려한 적절한 적분기의 초기값을 설정하였다. 그리고, 약간의 오버슈트를 허용하면서 빠른 응답을 갖는 적정 적분누적 방지 케이스를 영점과 극점 상쇄이득의 85%로 선정하였다. 제안된 적분누적 방지기법은 기존의 조건적분 및 추적역계산 적분누적 방지기법과 비교하여, 부하나 속도지령치의 변화 등의 운전조건에 영향을 받지 않고 설계된 응답특성을 항상 유지하였고, 적분누적 방지제어기 설계시 어려운 점인 반복설계의 번거로움을 없게 하였다. 이를, 모의실험 및 실제실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 기존방법과 비교 확인하고 우수성을 검증하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 지원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R08-2003-000-10906-0)

## 참 고 문 헌

- [1] C. Bohn and D.P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.34~40, Apr. 1995.
- [2] A.S. Hodel and C.E. Hall, "Variable-structure PID control to prevent integrator windup," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.48, no.2, pp.442~451, Apr. 2001.
- [3] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.48~57, Aug. 1996.
- [4] K.J. Aström and T. Hägglund, *PID controllers : Theory, design, and tuning*, ISA press, Research Triangle Park, North Carolina, Jan. 1995.
- [5] M.V. Kothare, P.J. Campo, M. Morari, and C.N. Nett, "A unified framework for the study of anti-windup design," *Automatica*, vol.30, no.12, pp.1869~1883, 1994.
- [6] K. S. Walgama, S. Ronnback, and J. Sternby, "Generalization of conditioning technique for anti-windup compensators," *IEE Proc. Control Theory and Application*, vol.139, no.2, pp.109~118, 1991.
- [7] A. Visioli, "Modified anti-windup scheme for PID controllers," *IEE Proc. Control Theory and Application*, vol.150, no.1, pp.49~54, Jan. 2003.
- [8] R. Hanus, M. Kinnaert, and J.L. Henrotte, "Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer

- method," *Automatica*, vol.23, no.6, pp.729~739, 1987.
- [9] K.J. Aström and B. Wittenmark, *Computer-controlled systems : theory and design*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.
- [10] N.J. Krikels, "State feedback integral control with intelligent integrator," *International Journal of Control*, vol.32, no.3, pp.465~473, 1980.
- [11] A. Hansson, P. Gruber, and J. Todtli, "Fuzzy anti-reset windup for PID controllers," *Control Eng. Pract.*, vol.2, no.3, pp.389~396, 1994.
- [12] 석줄기, 이동준, "고성능 유도전동기 구동을 위한 자동 투닝 Anti-windup 기법," 전력전자학회논문지, 1229-2214, 제10권1호, pp.29-37, 2005

## 저 자 소 개



### 최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경북대 전자전기공학부 부교수.

Tel. : 053-950-5515

Fax. : 053-950-5508

E-mail : jwchoi@ee.knu.ac.kr



### 이상철(李尙哲)

1970년 4월 23일생. 1994년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공박). 현재 경북대 전자전기공학부 박사후 연구원.

Tel. : 053-950-5515

Fax. : 053-950-5508

E-mail : sclee2@postech.ac.kr