

## 2자유도 적분형 최적제어법을 이용한 BLDC 모터의 속도제어

권혁진·정석권

부경대학교

(2000년 7월 15일 접수)

# Speed Control for BLDC Motors Using a Two-Degree-of-Freedom Optimal Control Technique

**Hyouk-Jin KWON and Seok-Kwon JEONG**

Pukyong National University

(Received July 15, 2000)

### Abstract

Brushless DC(BLDC) motors are widely used as AC servo motors in factory automation fields because of their quick instantaneous mobility, good energy saving efficiency and easiness of design for control system comparing with induction motors. Recently, a Two-Degree-of-Freedom(2DOF) PI control law has been adopted to some application parts to accomplish an advanced speed control of BLDC motors. The method can treat the two conflicting performances, minimum tracking errors versus reference inputs without large overshoot and rejection of some disturbances including modeling errors, independently. However, the method can not design the optimal system which is able to minimize tracking errors and energy consumption simultaneously.

In this paper, a 2DOF integral type optimal servo control method is investigated to promote the speed control performances of BLDC motors considering energy consumption. In order to applicate the method to the speed servo system of the BLDC motor, the motor is modeled in the state space using the vector control and decoupling technique. To verify the validity of the suggested method, some simulations and experiments are performed.

### 서론

최근 이<sup>1,2)</sup>등에 의해 전기 유압 서보 시스템을 이용한 어선의 조업자동화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 서보시스템의 액츄에이터로는 순간 최대토크의 응답성, 신뢰성 등을 고려하

여 주로 유압모터가 사용되고 있으나, 전기모터(이하 모터)의 사용도 일부 고려되고 있다.

BLDC(Brushless DC) 모터는 자계에 영구자석을 사용하는 동기모터로서, 순간 기동성이 뛰어나고, 에너지 절감이 가능하며, 유도모터에 비해 제어계의 설계가 용이하여 서보구동용으로 널리 사

용되어지고 있다<sup>3)</sup>. 최근에는 자성재료 기술의 발달로 중·대형 용량의 모터 제작이 가능하게 되어, 향후 AC서보용 주력모터가 될 것으로 기대가 되고 있어 효율적인 속도서보제어계 설계법 개발이 한층 기대되고 있다.

BLDC 모터의 순시토크제어법으로는 벡터제어방식이 가장 널리 사용되어지고 있다<sup>4)</sup>. 벡터제어계 구성시에는 자속축의 회전속도에 동기한 2축 좌표계상에서 제어직을 설계하는 것이 일반적이며, 이때 축간의 상호 간섭효과를 제거하기 위해 비간섭제어법이 사용된다<sup>5)</sup>. 속도서보제어계에서는 계의 안정성과 더불어 속도 지령치에 대한 양호한 추종특성 및 모델링 오차를 포함한 부하외란 인가시 이를 신속히 억제하는 양호한 외란억제 특성이 동시에 요구된다. 그러나, PI제어기에 의한 속도제어계 및 전류제어계 설계시는 이러한 상충된 두 요구를 동시에 충족시키는 것이 용이하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 2자유도제어법이 다수 적용되어지고 있다<sup>6,7)</sup>. 2자유도제어는 지령치에 대한 추종특성과 제어대상의 외란에 대한 제어특성을 독립적으로 설계하므로 외란에 대해 능동적으로 대처할 수 있다. 그러나 이제까지 BLDC 모터제어에 적용되어진 2자유도제어법은 주로 고전제어인 PI제어에만 국한되어 속도서보계의 최적성능에 관한 검토는 충분하지 못하였다.

2자유도 적분형 최적제어법은 이 2자유도 제어법을 최적 서보계에 적용한 것으로서, 우선적으로 적분보상을 포함하지 않는 최적추종계를 설계하고, 실제의 최적추종계와 그 동적 모델의 제어오차의 적분을 제어입력으로 인가하는 설계법을 제시하고 있다<sup>8-10)</sup>. 이 제어법은 제어대상에 모델링 오차나 외란이 존재하지 않을 경우에는 적분기에 의한 입력이 0으로 되어 적분기가 없는 최적서보계로서 동작하게 되고, 모델링 오차나 외란이 존재할 경우에만 적분보상값이 존재하게 되어 적분보상의 효과가 나타나도록 설계된 제어계이다. 이 제어법을 BLDC 모터의 속도제어에 적용하면 속도 지령치에 대한 양호한 추종특성 및 모델링 오차를 포함한 스텝상의 부하외란하에서도 신속한 외란 억제 특성을 동시에 얻을 수 있다. 또한 기존의 PI제어로는 달성하기 어려운 일정 평가함수에 대한 최적성

을 보장하는 최적제어계의 설계가 가능하게 된다.

본 연구에서는 BLDC 서보모터의 속도 제어성 향상을 위해 속도제어계에 2자유도 적분형 최적제어법을 적용하고 그 결과를 기존의 PI제어계 및 2자유도 PI제어계와 비교하였다. 이를 위하여 BLDC 모터를 전류와 각속도를 상태변수로, 인가 전압을 제어입력변수로 하여 상태공간 표현법으로 모델링하고, 이에 대한 제어계를 2자유도 적분형 최적제어법을 적용하여 설계하였다. 이 설계법에 의해 상태변수의 추종오차와 제어에 요하는 소비 에너지를 최소화하는 최적제어를 구현하면서 동시에 모델링 오차 그리고 스텝상의 부하외란의 입력에 대한 영향을 신속히 억제하도록 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. BLDC 모터의 모델링

#### 1.1 BLDC 모터의 회로방정식

BLDC 모터의 회로방정식은 로터와 동일한 속도  $\omega_{re}$ 로 회전하는  $d, q$ 좌표계상에서 일반적으로 다음과 같이 주어진다. 이 좌표계에서 계자가 만드는 자속의 방향은  $d$ 축, 여기에  $\pi/2$  앞선 위상을 갖는 축을  $q$ 축으로 잡고 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{da} \\ v_{qa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_a & -\omega_{re}L_a \\ \omega_{re}L_a & R_a + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qa} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{(단, } L_a = l_a + \frac{3}{2}M_a' = L_a' + \frac{1}{2}M_a', e_{qa} = \omega_{re}\Phi_{fa}\text{)}$$

여기서,  $v_{da}, v_{qa}$ 는  $d, q$ 축에서의 전기자전압,  $i_{da}, i_{qa}$ 는  $d, q$ 축에서의 전기자전류,  $R_a, L_a, M_a$ 는 전기자저항, 인덕턴스, 상호인덕턴스를 각각 나타낸다. 또한,  $p$ 는 미분연산자,  $e_{qa}$ 는 속도기전력,  $\Phi_{fa}$ 는 쇄교자속수,  $\theta_{re} = p\theta_{re}$  그리고  $\theta_{re}$ 는  $u$ 상의 전기자권선을 기준으로 해서 시계방향으로 취한 계자의 전기각을 각각 나타낸다.

한편, 모터에서 발생하는 순시토크  $T_e$ 는 상호 직교하는 전기자권선 쇄교자속과 전기자전류의 곱으로 식(2)와 같이 표시된다.

$$T_e = P\Phi_{fa} i_{qa} \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 모터의 극대수이다. 위 식에서, 자속

이 영구자석에 의해 발생되는 제자로 고정될 경우에는  $i_{qa}$ 만을 제어함으로써 순시토크를 제어할 수 있음을 알 수 있다.  $i_{da}$ 는 모터효율의 관점에서 일반적으로  $i_{da}=0$ 이 되도록 제어한다.

식(1)의 회로방정식을 상태방정식으로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$p \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \omega_{re} \\ -\omega_{re} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} v_{da} \\ v_{qa} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qa} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이는  $d, q$ 축의 전압  $v_{da}, v_{qa}$ 로  $d, q$ 축의 전류  $i_{da}, i_{qa}$ 를 제어하는 것을 나타낸다.  $e_{qa}$ 는 영구자석의 전기자권선 쇄교자속수에 의한 속도기전력이므로 제어가능한 파라미터가 아니다.

### 1.2 비간섭제어법

식(3)에서 볼 수 있듯이 BLDC모터는  $d, q$ 축 사이에 상호간섭항인 속도기전력이 존재한다. 식(4)에서와 같이 간섭항에 해당하는 값을 입력측에 역 부호로 입력시킴으로써 상호 간섭항을 제거할 수 있으며, 이를 비간섭제어라 부른다<sup>5)</sup>. 비간섭화된 제어 전압을  $v'_{da}, v'_{qa}$ 로 두면 식(1)은 식(4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} v_{da} &= v'_{da} - \omega_{re} L_a i_{qa} \\ v_{qa} &= v'_{qa} + \omega_{re} (\Phi_{fa} + L_a i_{da}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\omega_{re}, i_{da}, i_{qa}$ 는 검출 가능한 양이고,  $L_a, \Phi_{fa}$ 는 상수이므로 식(4)의 우변 제2항의 연산이 가능하다. 따라서,  $v'_{da}, v'_{qa}$ 는 이 식으로부터 쉽게 구해진다. 비간섭화된 모터는 다음과 같은 상태방정식으로 나타내어진다.

$$p \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} v'_{da} \\ v'_{qa} \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 2. 2자유도 적분형 제어에 의한 속도제어

### 2.1 2자유도 제어법에 의한 PI 속도제어

Fig. 1은 BLDC모터의 속도제어계 개략도를 보

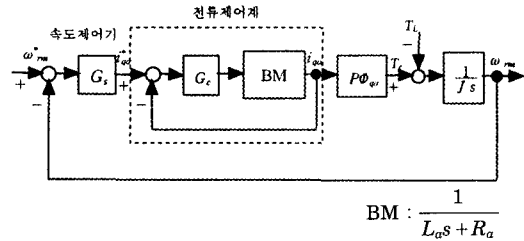


Fig. 1. Block diagram of speed control system.

인다. 전류제어기로는 안정성과 속응성의 만족 외에 정상편차를 없애기 위해 PI제어기를 쓴다. 전류제어계의 폐루프 전달함수는 개루프 전달함수의 단순 1차적분요소화를 통해 다음과 같은 단순 1차 지연요소로 만들 수 있다.

$$G_i^c(s) = \frac{1}{\frac{L_a}{K_i} s + 1} \quad (6)$$

( $G_{id}^c(s) = G_{iq}^c(s) = G_i(s)$ ,  $K_i$ :  $i_{da}, i_{qa}$  제어기의 비례게인)

$i_{qa}$  전류제어계에 속도제어기를 추가하면 식(7)과 같은 속도제어계가 얻어진다.

$$G_{sc}^o(s) = \left( K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right) \cdot \frac{1}{\frac{L_a}{K_i} s + 1} \cdot \frac{K_T}{JMS} \quad (7)$$

단, 속도제어기의 전달함수는  $G_s(s) = K_{sp} + K_{si}/s$  ( $K_{sp}, K_{si}$ : 비례게인 및 적분게인)이고, 토크정수는  $K_T = P\Phi_{fa}$ 이다. 전류제어계의 절점주파수  $\omega_c$ 와 PI 속도제어기의 절점주파수  $\omega_{pi}$ 는 각각 식(8), (9)와 같다.

$$\omega_c = \frac{K_{iq}}{L_a} \quad (8)$$

$$\omega_{pi} = \frac{K_{si}}{K_{sp}} \quad (9)$$

$\omega_c$ 와  $\omega_{sc}$ ,  $\omega_{pi}$ 와  $\omega_{sc}$  사이의 차를 크게 하면(통상 5배 이상) 전체 속도제어계의 절점주파수  $\omega_{sc}$  부근에서는  $G_{sc}^o(s)$ 를 단순 1차 적분요소로 근사화시킬 수 있어, 전류제어계 설계시와 같이 안정성, 속응성 뿐 아니라, 양호한 정상편차 제거성을 얻을 수 있다. 이 근사화 조작을 통해 설정한 각 절점 주파수에 의해 식(10)과 (8), (9) 등을 사용하여 각 제어

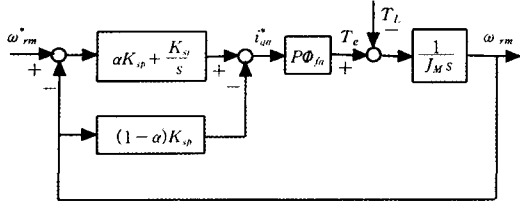


Fig. 2. Block diagram of 2DOF PI speed control system.

파라미터를 단계적으로 구할 수 있다.

$$K_{sp} = \frac{J_M \omega_{sc}}{K_T} \quad (10)$$

PI 속도제어기는 속도지령  $\omega_m^*$ 의 지령에 대한 모터속도  $\omega_m$ 의 응답의 오버슈트(overshoot)를 작게 하면서도, 부하토크  $T_L$ 에 대한 응답의 회복시간을 짧게 하는 속도제어를 실현하는 것이 곤란하다. 이를 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 제어계를 구성한다.  $i_{qa}$ 제어기는 간략화를 통해 1로 둔다. 여기서, 속도지령  $\omega_{rm}^*$  및 부하토크  $T_L$ 에 대한 모터속도  $\omega_m$ 의 전달함수는 각각 다음과 같다.

$$\frac{\omega_{rm}(s)}{\omega_{rm}^*(s)} = \frac{K_T(\alpha K_{sp}s + K_{sv})}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{sv}} \quad (11)$$

$$\frac{\omega_{rm}(s)}{T_L(s)} = -\frac{s}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{sv}} \quad (12)$$

이들 전달함수에서  $T_L$ 에 대한  $\omega_{rm}$ 의 응답특성은  $K_{sp}$  및  $K_{sv}$ 의 값에 의해 결정되지만,  $\omega_{rm}^*$ 에 대한  $\omega_{rm}$ 의 응답특성은  $K_{sp}$ ,  $K_{sv}$  값 외에 파라미터  $\alpha$ 의 값에도 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉,  $\omega_{rm}^*$  및  $T_L$ 에 대한  $\omega_{rm}$ 의 응답특성을 독립적으로 설정할 수 있다. 이같이 Fig. 2의 제어기는 2개의 응답특성을 독립적으로 설정 가능한 까닭에 2자유도계라 불린다. 2자유도 PI 속도제어기는  $\omega_{rm}^*$ 의 스텝변화에 대한  $\omega_{rm}$ 의 오버슈트가 작고  $T_L$ 에 대한 응답의 회복시간이 짧은 이상적인 속도제어가 가능하다. 그러나, 이 2자유도 속도제어기는 모델링오차로 인한 제어오차의 최소화와 동시에 입력에너지를 최소화하는 최적제어에 대한 해를 주지는 못한다.

### 2.2 2자유도 적분형 최적서보계의 설계

2상  $d, q$ 좌표계에서의 모터의 회로방정식에서

상태방정식을 유도하고, 이를 이용하여 2자유도 적분형 최적서보계를 설계한다<sup>8)</sup>. 비간섭계에서 모터의 모델링과 제어계를 설계하면 비간섭화된 모터의 회로방정식은 식(13)과 같고, 이를 상태방정식으로 바꾸면 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}'_{da} \\ \dot{v}'_{qa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_a & 0 \\ 0 & R_a + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{bmatrix} \quad (13)$$

이 식에서 상태변수는  $i_{da}, i_{qa}$ 이고, 제어입력은  $v'_{da}, v'_{qa}$ 이다. 여기서  $\omega_{rm}$ 을 제어하기 위해 상태변수  $\omega_{rm}$ 를 추가로 도입하면 식(5)는 다음과 같은 상태공간표현법으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14.a)$$

$$y = Cx \quad (14.b)$$

$x = [i_{da} \ i_{qa} \ \omega_{rm}]^T$ 는 상태변수,  $u = [v'_{da} \ v'_{qa}]^T$ 는 제어입력변수 그리고 상첨자  $T$ 는 행렬의 전치를 각각 나타내고, 각 계수행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ 0 & P\Phi_{qa}/J_M & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2자유도 적분형 최적서보계는 Fig. 3과 같이 나타내진다. 제어대상과  $H_0, F_0$ 의 제어 계인으로 이루어진 최적추종계에 적분보상기  $F_1, G$ 를 추가하여 2자유도의 확대계로 만든 것이다. 이는 제어대상의 기술오차 및 외란이 존재하지 않으면 어떤 형태의  $G$ 를 사용해도 목표신호  $r$ 에 대해 제어출력  $y$ 는 적분보상이 없는 최적추종계의 거동을 하며, 제어대상이 변동하고 정치외란이 가해질 때에는  $z$ 가 0으로 되지 않아 적분보상의 효과가 나타나는 것이다.

이하에서는 각 계수행렬의 값을 결정하는 방법에 대해 설명한다.

우선, 최적레귤레이터 이론에서 평가함수 식(15)를 만족하는 적당한 정정행렬  $Q$ 와  $R$ 을 정하고 Riccati 방정식(16)을 만족하는 반정행렬  $P$ 로부터 식(17)을 구한다. 여기서,  $u_\infty$ 는 제어입력의

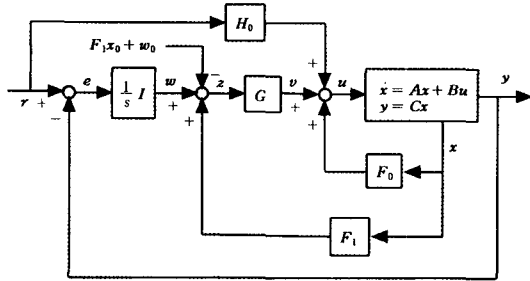


Fig. 3. Servo system of 2DOF optimal control technique.

최종 목표치이다.

$$J = \int_0^{\infty} \{e^T(t)Qe(t) + \tilde{u}^T(t)R\tilde{u}(t)\}dt \quad (15)$$

(단,  $e(t) = r(t) - y(t)$ ,  $\tilde{u}(t) = u(t) - u_{\infty}$ )

$$A^T P + PA + PBR^{-1}B^T P + C^T QC = 0 \quad (16)$$

$$F_0 = -R^{-1}B^T P, H_0 = \{-C(A + BF_0)^{-1}B\}^{-1} \quad (17)$$

$F_1$ 은 Fig.3에서  $e(t)$ 의 적분값  $w(t)$ 의  $\dot{x}(t)$ 에 대한 계수로서 다음과 같다.

$$F_1 = C(A + BF_0)^{-1} = C(A - BR^{-1}B^T P)^{-1} \quad (18)$$

$G$ 는  $F_1 B G$ 가 안정행렬이 되도록 선택해야 제어계가 안정하므로 다음과 같이 표현된다.

$$G = (F_1 B)^{-1} \times (\text{안정행렬}) \quad (19)$$

특히, 이 안정행렬을  $-(F_1 B)R^{-1}(F_1 B)^T W$  ( $W$ 는 정정대칭행렬)로 선택하여 식(20)과 같이 정하면, 전체 제어계는 어떤 평가함수에 대해서도 최적해가 된다.

$$G = -R^{-1}(F_1 B)^T W \quad (20)$$

### 결과 및 고찰

2자유도 PI제어법과 2자유도 적분형 최적제어기법을 비교하기 위해 시뮬레이션한 모터의 파라미터 값들은 Table 1과 같다. 여기서  $P_R$ 은 정격출력,  $T_{eR}$ 은 모터의 정격토크이다.

2자유도 PI제어계의 제어파라미터 값들은 다음과 같다.  $\omega_c$ 는 현재 사용되는 인버터의  $f_c$ 의 한도가 10kHz 정도이므로  $\omega_c = 2\pi f_c / 3$ 의 관계에서 20,000

Table 1. Motor Parameters

$P_R$	800[W]	$R_a$	0.425 [ $\Omega$ ]
$N_{rm}$	2000 [rpm]	$L_a$	0.00378 [H]
$\Phi_{fa}$	0.233 [V · s/rad]	$P$	2
$J_M$	0.000260204 [N · m · s <sup>2</sup> /rad]	$T_{eR}$	3.82 [N · m]
$D_M$	0.0000001 [N · m · s/rad]	$i_{qaR}$	8.20 [A]

rad/s로 주었다.  $\omega_{sc}$ 와  $\omega_{pi}$ 는  $\omega_{sc} = \omega_c / 5$ ,  $\omega_{pi} = \omega_{sc} / 5$ 인 관계에서 각각, 4,000rad/s, 800rad/s가 되고,  $K_i$ ,  $K_{sp}$ ,  $K_{si}$ 는 식(8), (9), (10)에 의해 각각  $K_i = 75.6V/A$ ,  $K_{sp} = 2.2335A \cdot s/rad$ ,  $K_{si} = 1786.8086 A/rad$ 으로 된다.  $\alpha$ 는 반복시행법에 의해  $\alpha = 0.75$ 로 설정했다.

2자유도 적분형 최적제어계의 제어파라미터 값들은 다음과 같다. 반복시행법에 의해 구해진 하중행렬  $Q$ ,  $R$  그리고 행렬  $W$ 의 값과 이에 의해 구해진 나머지 파라미터  $F_0, F_1, H_0, G$  값이다.

$$Q = \text{diag}([10 \ 10 \ 6000000])$$

$$R = \text{diag}([10 \ 2500])$$

$$W = \text{diag}([10 \ 10000000000])$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} -0.6616 & 0 & 0 \\ 0 & -25.3329 & -48.9898 \end{bmatrix}$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} 1.0866 & 0 \\ 0 & 48.9898 \end{bmatrix}$$

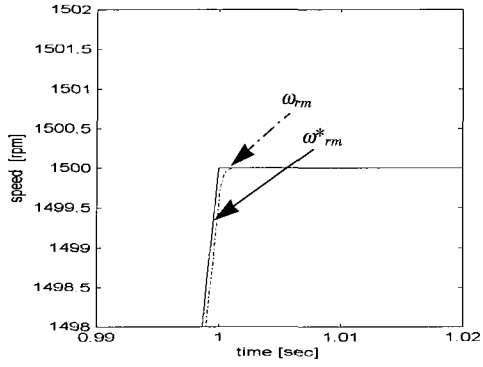
$$F_1 = \begin{bmatrix} -0.0035 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0001 & -0.0003 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.9203 & 0 \\ 0 & 81649.6581 \end{bmatrix}$$

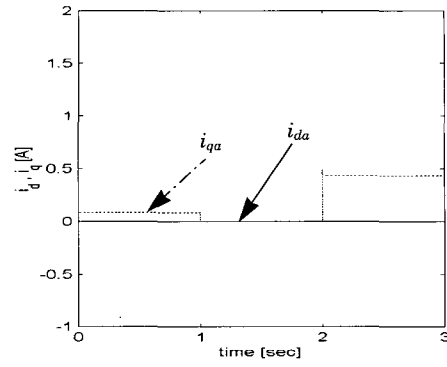
### 1. 시뮬레이션 결과

입력신호는 모터의 인가전압 및 전류의 특성을 고려하여 스텝입력으로 주지 않고 0~1초 사이에는 0~1500rpm로 가속하고 1초~3초까지는 등속으로 유지하는 입력을 가했다. 외란 토크는 2초에 스텝입력으로 0.2N · m(구동 최대토크의 약 200%)를 가했으며, d축 전류를 0으로 제어하기 위해  $i_{da}^* = 0$ 의 지령을 입력했다. 시뮬레이션은 MATLAB을 이용했다.

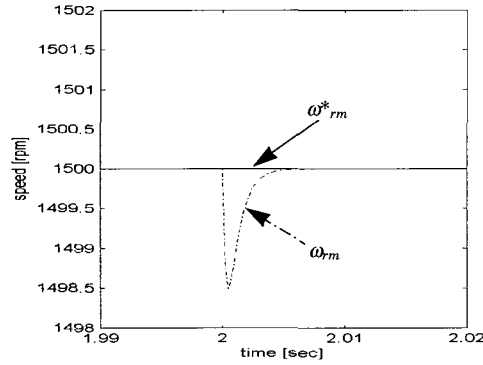
2자유도 PI제어계의 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다. (a)는 정상속도 도달시(1초)의 속도지령과 응답, (b)는 외란토크가 인가되었을 때(2초)의 속도지령과 응답, (c)와 (d)는 전 시뮬레이션 구간



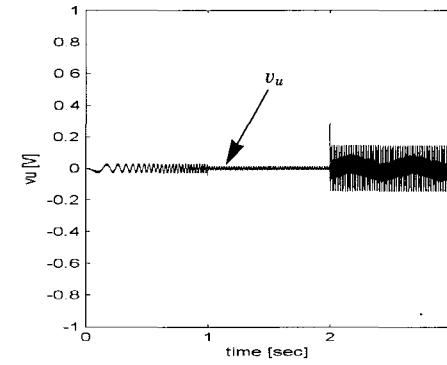
(a) Speed reference & response (1sec)



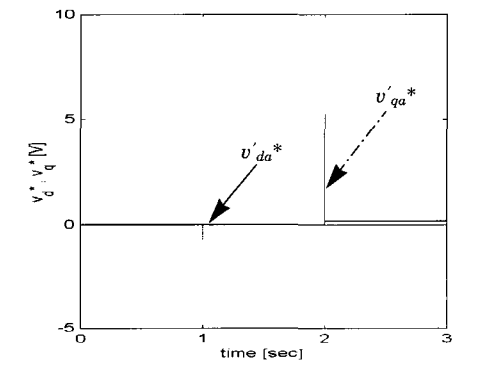
(d) Current response in  $d$ - $q$  rotating reference frame



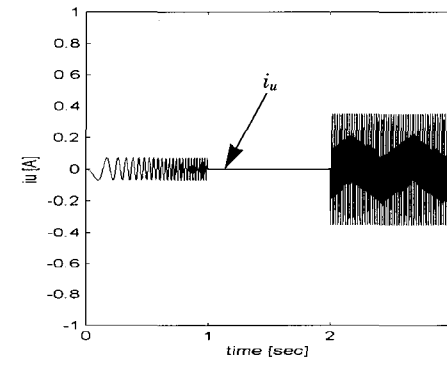
(b) Speed reference & response (2sec)



(e) Voltage reference of  $u$  phase in 3 phase axes



(c) Voltage reference in  $d$ - $q$  rotating reference frame



(f) Current response of  $u$  phase in 3 phase axes

**Fig. 4. Simulation results of 2DOF PI speed control system (a~f).**

에서의  $d, q$  좌표계에서의 전압지령과 전류응답, (e)와 (f)는 3상 좌표계에서의  $u$ 상 전압지령과 그 전류응답이다. (a)에서 오버슈트는 약  $0.0012rpm$ , 정상상태도달시간은 약  $0.001sec$ 였다. (b)에서 외란인가시 출력오차는 약  $1.5rpm$ , 정

상상태도달시간은 약  $0.0055sec$ 였다. 동 그림의 (c)와 (d)에서 지령신호가 바뀔 때마다  $d, q$ 축 전압지령, 전류응답에 과도현상이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한, 동 그림의 (e)와 (f)는  $d, q$ 축 전압, 전류가 좌표변환에 의해 3상 정현파로 변환되고

2자유도 적분형 최적제어법을 이용한 BLDC 모터의 속도제어

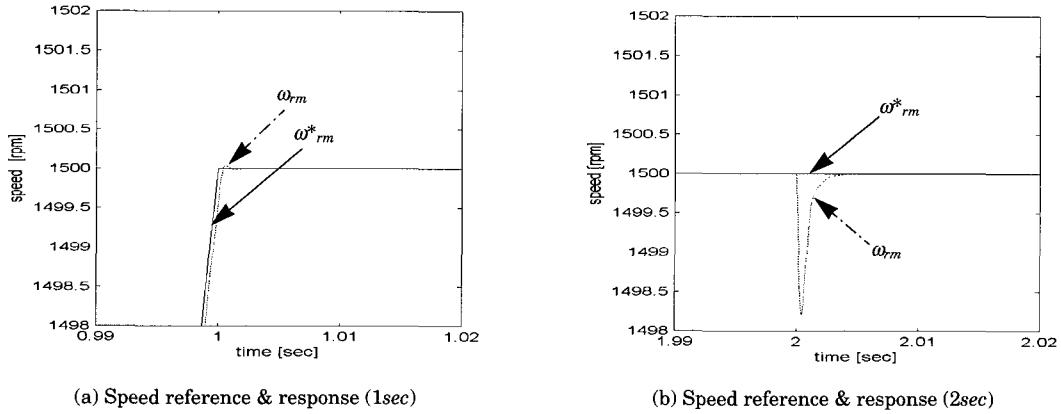


Fig. 5. Simulation results of 2DOF optimal control system (a~b).

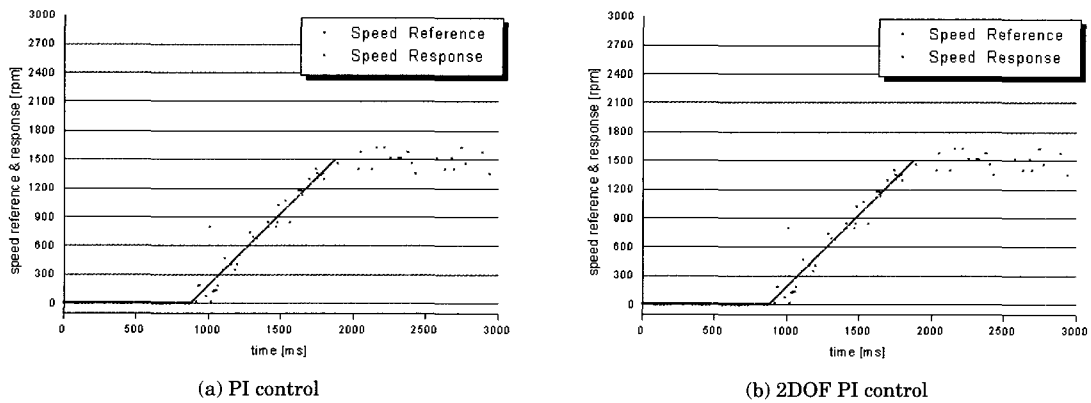


Fig. 6. Experimental results (speed reference and response).

있음을 보인다.

2자유도 적분형 최적제어계의 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 모터 인가전압 및 전류레벨을 2자유도 PI제어계의 경우로 근사시켜 놓고, 제어를 행했을 때의 결과이므로 전압지령 및 전류응답의 데이터는 생략하였다. 시뮬레이션 결과 2자유도 적분형 최적제어계의 내부조건이 2자유도 PI제어계와 같을 때의 속도추종 및 외란억제특성은 2자유도 PI제어에 비해 그다지 좋은 성능을 보이지 못했다. 다만, 정상상태 도달시간은 PI 및 2자유도 PI제어계에 비해 다소 나은 결과를 보였으며, 정격의 전압 및 전류한도내에서 제어파라미터 값을 조절함으로써 명령추종성 및 외란억제특성을 2자유도 PI제어에 비해 향상시킬 수 있었다.

2. 실기실험 결과

실기실험을 위해 사용한 BLDC 모터의 사양은 Table 2와 같다. 이 모터는 30 : 1 비의 기어부착 모터이다. 구동을 위해 DSP(TMS320C32)를 기반으로 한 인버터 및 인버터 제어보드를 사용하였으며, 사용된 엔코더는 Incremental형이다. 제어를 위한 알고리즘은 "C"언어를 사용하였으며, 컴파일러는 T.I.사의 "TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C Compiler Ver 4.70"을 사용하였다.

실험결과는 Fig. 6과 같다. 속도지령은 시뮬레이션과 동일하게 1초간 0~1500rpm으로 상승한 뒤 등속운동을 유지하도록 하였다. 이번 실험에서는 부하인가장치가 설치되지 못한 까닭에 부하의

**Table 2. Motor Parameters( HA - FE33G )**

$P_R$	300 [W]	$R_a$	2.675 [ $\Omega$ ]
$N_{rm}$	3000 [rpm]	$L_a$	0.0183 [H]
$\Phi_{\hat{a}}$	0.28363 [V · s/rad]	$P$	2
$J_M$	0.0000537 [ $N \cdot m \cdot s^2/rad$ ]	$T_{eR}$	0.95 [ $N \cdot m$ ]
$D_M$	0.0000001 [ $N \cdot m \cdot s/rad$ ]	$i_{qaR}$	1.68 [A]

란의 인가 없이 PI제어와 2자유도 PI제어의 속도 추종특성에 관한 성능비교만을 수행하였다.

PI제어와 2자유도 PI제어의 실험결과는 응답속도가 많은 리플성분을 포함하고 있는데 이는 정현파 전압이 인가되는 시뮬레이션 조건과는 달리 실험에서는 PWM으로 인한 구형파 전압이 모터에 인가되는 관계로 전류에 고조파가 많이 함유된 것이 주된 원인이다. 향후 이러한 속도변동률을 최소화 하기 위해 적절한 LPF(Low Pass Filter)설계가 필요할 것으로 사료된다.

실험결과에서 나타난 속도지령치 추종특성은 PI 및 2자유도 PI제어 모두 그 변동률이 약  $\pm 150rpm$ 으로 나타났다. 이는 10%의 오차범위내로 PI제어나 2자유도 PI제어 모두 속도지령에 대해 대체로 양호한 속도응답특성을 보이고 있다.

**요 약**

본 논문에서는 BLDC 서보모터의 속도 제어성 향상을 위해 속도제어계에 2자유도 적분형 최적 제어법을 적용하고 그 결과를 기존의 PI제어계 및 2자유도 PI제어계와 비교하였다. 2자유도 적분형 최적제어법은 PI제어법이 갖는 지령치 추종특성과 외란 억제특성간의 트레이드오프 문제를 해결하고, 제어계의 최적성을 확보하고자 도입되었으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유효성을 고찰하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 2자유도 적분형 최적제어계는 PI제어계에 비해 양호한 지령치 추종성과 외란 및 모델링 오차제거 특성을 보였다.
- (2) 2자유도 적분형 최적제어계는 제어파라미터인 하중행렬  $Q, R$  및  $W$ 에 대한 제약요건이 없을 경우, 모터의 정격조건 하에서 이들을 적절히 설정함으로써 2자유도 PI제어계보

다도 양호한 지령치 추종성과 외란 및 모델링오차 제거 특성을 얻을 수 있다.

- (3) 2자유도 적분형 최적제어계는 인가전압 및 전류의 크기를 2자유도 PI제어계의 그것과 동일하게 제약할 경우 2자유도 PI제어계에 비해 지령치 추종에 관한 정정시간 외에는 그다지 우수한 성능을 보이지 않았다.

또한, 실험을 통해 고찰한 PI 및 2자유도 PI제어계의 속도추종성능은 시뮬레이션 결과와 거의 동일하였다. 2자유도 적분형 최적제어계에 대한 실험결과는 논문에 나타내지 못하였으나, PI 및 2자유도 PI제어계의 실험결과에서 알 수 있듯이 2자유도 적분형 최적제어계도 시뮬레이션 결과와 같은 경향을 보일 것으로 사료된다.

따라서, 본 논문에서 검토된 방법은 기존의 PI제어계가 갖는 지령치 추종과 외란억제의 트레이드오프 문제를 상당부분 해결가능할 것으로 보인다. 또한, 일정의 부하외란 및 모델링 오차내에서는 2자유도 PI제어계 보다 나은 제어성능을 보여 BLDC 모터의 속도 제어성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대가 된다.

향후, 2자유도 적분형 최적제어계의 실험결과를 통한 엄밀한 제어성능검증과 스텝외란 외의 주기성 외란 인가시 2자유도 적분형 최적제어계의 외란제거 방안 등이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

**참고문헌**

1. 이대재 · 신현욱 · 신형호(2000) : 소형 연근해 어선의 조업 시스템 개선에 관한 연구 - I, 한국어업기술학회지 36(1), 12~24.
2. 이대재 · 신현욱 · 신형호(2000) : 소형 연근해 어선의 조업 시스템 개선에 관한 연구 - II, 한국어업기술학회지 36(1), 25~32.
3. Dote, Y. and Kinoshita, S.(1990) : Brushless Servomotors, Clarendon Press.
4. Blaschke, F.(1972) : The Principle of Field Orientation as Applied to the New TRANSVEKTOR Closed-Loop Control System for Rotating-Field Machines, Siemens Review, 34, 217~220.
5. 杉本英彦 · 小山正人 · 玉井伸三(1990) : ACサボシテムの理論と設計の實際, 綜合電子出版社, 14~



- 16, 76~80.
6. Shu Yamamoto 외 4인(1996) : A Design of Two-Degree-of-Freedom PID Position Controller for Linear Servo Motor Drives”, T.IEE Japan, 116-D(8), 868~873.
  7. Tewodros Tesfaye and Yasuzumi Ochiai(1998) : Two-degree-of-freedom I-PD Position Controller Design for a Linear Pulse Motor Driver by Controller Diagram Method, (CDM), ICARCV '98, 434~438.
  8. 荒木光彦(1985) : 2自由度制御系-I, システムと制御, 649~656.
  9. 兒玉・順田(1978) : システム制御のためのマトリクス理論, 計測自動制御協會, 350~351.
  10. 池田・須田(1988) : 積分サボ系の2自由度構成, 第31回自動制御連合講演會, 115~116.
  11. 計測自動制御學會(1997) : 現代制御理論入門 세미나, 計測自動制御學會, 61~64.
  12. 김영복(1996) : 2自由度積分形サボ系のハイゲイン化に関する研究, 神戸大學博士論文, 9~17.
  13. 권혁진·김영복·정석권(1999) : 2자유도 제어기법을 이용한 BLDC 모터의 속도제어, 한국동력기계공학회 춘계 학술논문집, 325~331.
  14. 권혁진(2000) : 2자유도 적분형 최적제어법을 이용한 BLDC 모터의 속도제어, 부경대학교 석사학위논문.