

## 센서리스 벡터제어의 속도추정기에 사용되는 PI제어기의 최적이득 설계

### The optimum gain design of PI Controller using a speed estimation in Sensorless vector-control

김 형 준, 조 내 수, \*구 본 호, \*\*윤 경 섭, 권 우 현  
경북대학교 전자공학과, \*경일대학교, \*\*거창전문대  
전화 : 053-940-8526 / 핸드폰 : 016-815-9563

Hyung-Jun Kim, Nae-Sue Cho, Bon-Ho Ku, Kyung-Sup Youn, Woo-Hyen Kwon  
Kyungbook National University  
E-mail : sonnim-gk@lycos.co.kr

**Abstract** - It is waste of time in industrial plant that the PI controller gain tuning.. The PI controller has many trial-and-error steps for gain design. This paper proposes the optimum gain design of PI controller using a speed estimation in sensorless vector-control. In this method, a degree of stability and Hurwitz theory are applied and the controller gain is expressed by system parameters.

**Key Words** : optimum gain, sensorless, vector-control, PI controller, speed estimation

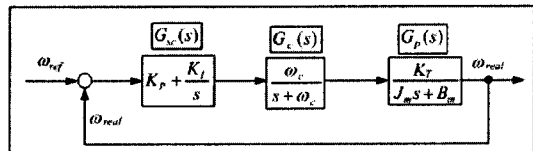
#### 1서론.

유도전동기의 벡터제어의 문제점을 해결하기 위하여 속도센서를 별도로 부착하지 않고 벡터제어를 가능하게 하는 센서리스 벡터제어가 등장하게 되었다. 센서리스 벡터제어에 필요성에 의해서 회전자 속도추정방법이 중요한 과제가 되어 왔다. 회전자 자속 또는 회전자의 위치 추정방법으로는 전압 모델, 모델기준제어, 상태추정기, 칼만필터, 그리고 비선형제어 혹은 지능제어등을 이용하는 많은 방법들이 있다. 회전자 자속 또는 회전자의 위치 추정을 위해서는 회전자의 정확한 속도추정이 필수인데, 이때 PI제어기를 설계하게 된다. 일반적으로 사용되는 속도제어기의 경우 구현이 간단하고 비교적 성능이 우수한 PI형 제어기를 많이 사용하고 있다. PI형 제어기에는 PI제어기 및 PI제어기에 비해 속도는 느리나 오버슈트를 억제할 수 있고 진동이 적은 IP제어 방식을 사용하기도 한다. 이런 PI형 제어기의 문제점은 제어기 이득 선정에 따른 많은 시행착오를 가진다는 것이다. 일반적으로 제어기의 이득선정 방법에는 경험에 의한 방법과 전달함수의 응답특성 및 보데 선도를 이용하여 이득을 설정하는 방법 등이 이용되고 있다.[2] 그러나 이런 방법들은 시스템의 파라미터 변동 및 부하변화에 대하여 제어기의 이득을 재설정해야 하는 문제점이 발생한다.

본 논문에서 빠른 응답특성을 가지는 고성능 구동 시스템의 설계를 위해 안정성도 최대화 방법[3,4]을 이용하였고 기존 속도추정기에서 사용되는 PI제어기의 문제점인 이득 설정에 따르는 시행착오를 최소화하는 최적화방법을 제안한다. 설계된 제어기의 성능을 확인하기위해서 Matlab Simulink를 이용한 모의실험을 수행하였다.

#### II. 제어기 설계

##### 2.1 속도제어기의 이득 설계 방법



<그림 1>

<그림 1>은 일반적인 속도제어기의 구조를 나타내고 있다. 여기서,  $G_{sc}(s)$ ,  $G_{cc}(s)$ ,  $G_p(s)$ 는 각각 속도제어기 및 전류제어기 및 기계적 시스템을 나타낸다. 또  $K_p$ ,  $K_I$ 는 PI 속도제어기의 이득을  $\omega_c$ 는 전류제어기의 대역폭을

$K_T, J_m, B_m$ 은 각각 토크 상수와 관성계수 및 마찰계수를 나타낸다.

그림 1의 속도제어기 특성방정식  $Q(s)$ 는

$$Q(s) = s^3 + \left(\frac{B_m + J_m w_c}{J_m}\right)s^2 + \left(\frac{B_m w_c + K_T K_P w_c}{J_m}\right)s + \frac{K_T K_I w_c}{J_m} \quad (5)$$

로 주어진다.

먼저 안정성도[3,4] 최대화 되는 이득을 구하기 위해 식 (5)에  $s = q - \gamma$ 를 대입하여 변환된 새로운 특성방정식  $Q_t(q)$ 는

$$Q_t(q) = Q(q - \gamma) = c_{0t}q^3 + c_{1t}q^2 + c_{2t}q + c_{3t} \quad (6)$$

로 주어진다. 여기서

$$c_{kt} = \frac{1}{(n-k)!} \frac{\partial^{n-k} Q(\lambda)}{\partial \lambda^{n-k}} \Big|_{\lambda = -\gamma}, k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

와 같다. 이것은 원래의 특성방정식의 근을 허수축으로  $\gamma$ 만큼 이동시키는 것을 의미한다. 식 (6), (7)에 Hurwitz의 행렬식과 Mikhailov 안정도 판별법[4]을 적용하여 필요안정 한 조건을 나타내면

$$c_{0t} \geq 0, c_{1t} \geq 0, c_{2t} \geq 0, c_{3t} \geq 0, \Delta_2 \geq 0 \\ Q_t(jw) = u_t(w) + jv_t(w) = 0 \quad (8)$$

로 주어진다. 또 어떤 매개변수  $\delta$ 에 대하여 안정성도가 최대가 되는  $\gamma$ 를 구하기 위해서 식 (8)을 이용한다. 위의 식 (8)에서  $\gamma$ 가 가능한 최대 값의 한계 식 (9)와 안정성도의 정의로부터  $\gamma = \min_i |Re(\gamma_i)|$  이기 때문에 식 (10)로 나타 낼 수 있다.

$$Q(s) = c_0(s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n) \\ = c_0(s^n - (s_1 + s_2 + \dots + s_n)s^{n-1} + \dots) \\ = c_0\left(s^n + \frac{c_1}{c_0}s^{n-1} + \dots\right) \quad (9)$$

$$0 < \gamma \leq \gamma_{max} = \frac{1}{n} \frac{c_1}{c_0} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 어떤 특성근의 실수 절대 값이  $\gamma_{max}$  보다 더 크면 반드시 실수 절대 값은  $\gamma_{max}$  보다 더 작은 근이 존재 하므로, 이 경우 안정성도는  $\gamma_{max}$  보다 반드시 작아짐을 알 수 있다. 안정성도가 최대가 되는 제어기의 이득을 구하기 위해서 식 (7)과 (8)에서  $Q_t(q)$ 의 각 계수들은 식 (11)로 주어진다.

$$c_{3t} = -\gamma^3 + a_1\gamma^2 - (a_2 + b_0K_P)\gamma + b_0K_I \\ c_{2t} = 3\gamma^2 - 2a_1\gamma + a_2 + b_0K_P \\ c_{1t} = -3\gamma + a_1, c_{0t} = 1 \quad (11)$$

식 (11)에서 구한 각 계수들을 식 (8)에 적용하여 정리하면

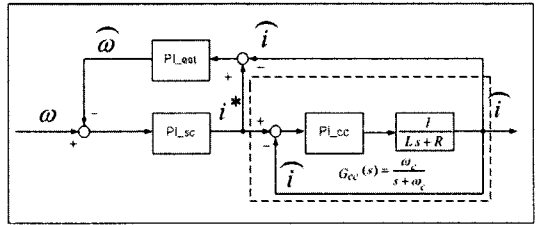
$$K_P = \frac{J_m}{w_c K_T} \left\{ \frac{1}{3} \left[ \frac{(w_c J_m + B_m)}{J_m} \right]^2 - \frac{w_c B_m}{J_m} \right\} \\ K_I = \frac{J_m}{27 w_c K_T} \left[ \frac{(w_c J_m + B_m)}{J_m} \right]^3 \quad (12)$$

로 주어진다. 설계를 간단히 하기 위하여 마찰계수를 부하에 포함 시키면 식 (12)는

$$K_P = \frac{J_m w_c}{3 K_T}, \quad K_I = \frac{J_m w_c^2}{27 K_T} \quad (13)$$

로 간단하게 나타낸다.

## 2.2 속도추정기에서의 이득 설계



<그림 2>

그림 2는 센스리스 벡터 제어에서의 속도 추정을 나타내는 그림이다.

그림 2에서  $w$ 는 기준 속도를 나타내고,  $\hat{w}$ 는 추정된 속도를 나타낸다.  $i^*$ 는 속도 제어기로부터 나오는 전류의 기준 값을 나타내고 있고,  $\hat{i}$ 는 모터에 후반에서부터 추정된 전류 값을 나타낸다.  $G_{cc}$ 는 전류 제어기와 모터의 페루프 gain 을 나타내고,  $PI_{sc}$ 는 속도제어기의 gain을 나타내며  $PI_{est}$ 는 속도추정을 위한 PI제어기를 나타낸다.

$$PI_{sc}(s) = \frac{\frac{J_m w_c}{3 K_T} s + \frac{J_m w_c^2}{27 K_T}}{s} = \frac{J_m w_c}{3 K_T} \left( s + \frac{w_c}{9} \right) \quad (14)$$

$$PI_{est}(s) = \frac{K_P s + K_I}{s} = \frac{K_P \left( s + \frac{K_I}{K_P} \right)}{s} \quad (15)$$

위 그림의 입력대 출력의 전달 함수를 간략화 하여 구해 보면 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$M = \frac{K_{sp}w(s + \alpha)}{(K_{sp}K_p)s^2 + (K_{sp}K_p\beta + K_{sp}K_p\alpha)s + K_{sp}K_p\alpha\beta} \quad (16)$$

여기서,  $\alpha = \frac{K_{SI}}{K_{SP}}$ ,  $\beta = \frac{K_I}{K_P}$  이고,  $K_{SP}$ ,  $K_{SI}$ ,  $K_P$ ,  $K_I$ 는 각각 속도제어기의 P, I gain과 속도 estimation에서의 P, I gain을 나타낸다.

Hurwitz의 안정도 판별법에 의해  $K_P > 0$ ,  $K_I > 0$  인 것은 쉽게 알 수 있고, 실제의 기준속도보다 추정하는 속도가 더 빠를 수는 없다. 기준속도가 추정속도의 약 10배가 빠르다고 한다면,

$$\alpha = 10\beta \quad (17)$$

로 나타낼 수 있고, 식 (14)를 참조하면 식 (18)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\alpha = \frac{w_c}{9}, \beta = \frac{K_I}{K_P}$$

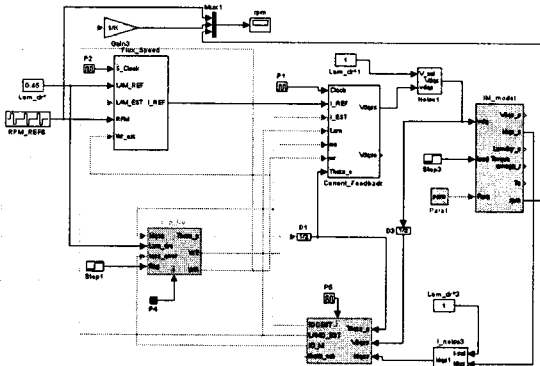
$$\alpha = 10\beta = \frac{w_c}{9} = 10 \frac{K_I}{K_P} \quad (18)$$

$$\therefore K_P = \frac{90K_I}{w_c}, K_I = \frac{K_P \cdot w_c}{90}$$

### III. 모의실험 결과

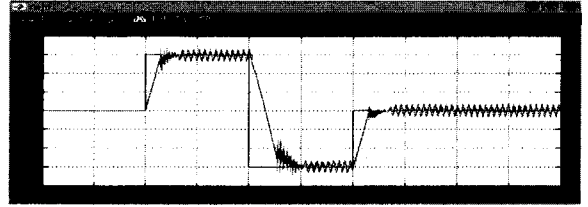
모의실험은 Matlab Simulink를 이용하였고, 센스리스 벡터 제어의 자속 추정기법은 otani의모델을 구현하여 사용하였다. 이때, 전류 제어기의 대역폭은 3000[rad/sec]으로 하였다.

#### 3.1 블록도

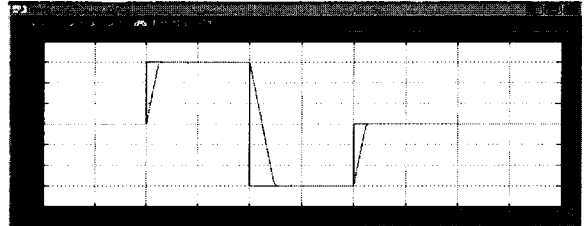


<그림 3>

#### 3.2 PI제어기의 이득 설정에 따른 응답특성도



<그림 4>



<그림 5>

<그림 4>와 <그림 5>는 각각 제어기의 이득 설정값이 잘못된 경우와 올바른 제어기 이득설정값에 따른 응답특성도를 보인 것이다. <그림 4>에서 보듯이 제어기의 이득설정값이 틀려짐에 따라 응답곡선이 찌그러짐을 알 수 있다.

### IV. 결론

본 논문은 기존의 센스리스 벡터 제어를 이용한 전동기 구동 시스템에서 사용되는 속도제어기의 이득설정값과 속도 추정기에서 사용되는 PI제어기의 이득 설정에 따른 오차를 최소화 하는 방안을 제시 하였다. 또 이러한 시스템의 설정 값을 직접 Matlab Simulink에 적용하여 제어기의 응답특성이 매우 우수함을 보였으며, 이러한 결과를 토대로 실험을 통한 검증이 필요하다.

### 참고 문헌

- [1] Gordon R. Slemon, "Electical Machines for Variable-Frequency Drives," *Proceedings of the IEEE-Special Issue on Power Electronics and Motion Control*, vol. 82, no.8, pp.1123~1139, Aug, 1994.
- [2] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering, 2nd," Prentice-Hall, pp.579-588, 1996
- [3].S.P. Bhattacharyya, H. Chapellat and L. H. Keel, "Robust Control The Parametric Approach," Prentice-Hall, 1995.
- [4] Dmitri P.KIM, "Automatic Control Theory of Linear Control System," 한울출판사, p.115-199, 1998.
- [5] Charles L.Phillips and H.Troy Nagle, "Digital Control System Analysis and Design, 2nd." *Prentice hall*, 1990
- [6] J. H. Jung, S. K. Lim, and K. H. Nam, "PI Type Decoupling Control Scheme for High Speed Operation of Induction Motors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.46, No. 1, Feb, 1999.
- [7] 석출기, 이동춘, "전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동시 스템의 속도제어기 설계," *전력전자 학회 논문지 제7권 5호*, pp.465-471, 2002.