유도전동기에서 극점배치기법을 이용한 PID제어기 설계

김영춘*, 조문택**, 송호빈***, 정형근****, 이충식**, 맹승렬*, 유정봉*
*공주대학교, **대원대학, ***(주)휴스컴, ****한양대학교

e-mail: mtcho@mail.daewon.ac.kr

PID Comtroller Design using Pole-Placement in the Induction Motor

Young-Chun Kim*, Moon-Taek Cho**, Ho-Bin Song***, Hyung-Keun Jung****, Sik-Chung Lee**, Seung-Ryoul Maeng*, Jeong-Bong You*
*KongJu National Univ., **DaeWon Univ. College,
***Huscom CO., ****HanYang Univ.

요 약

본 논문에서는 유도전동기와 제어기의 폐루프 극점을 원하는 위치에 배치하여 유도전동기를 위한 PID제어 동조파라미터를 얻어 유도전동기를 제어하는 방법을 제안한다. 이러한 설계방법은, 설계요건 뿐만 아니라 제어기 고유의 안정도와 강인성까지 제공하므로 매우 유용하다.

1. 서론

유도전동기는 기계적 구조가 견고하고 보수점검 및 유지가 용이하며 가격이 비교적 저렴하다는 장점이 있다. 그러나 유도전동기는 비선형 특성[1] 때문에 직류전동기에 비해 성능이 저하되는 단점을 내포하고 있다. 따라서 제어성능의 향상을 목표로 전동기 기술, 전력변환 기술, 제어기술 및 센서 기술등의 종합적 기술을 필요로 하는 유도전동기 제어에 관한 연구는 이들 시스템에 관한 이론과 기술의 진보와 함께 유기적인 관계를 유지하며 발전하고 있다. 제어기술 관점에서 보면 유도전동기의 속도제어를 위해서는 이를 상태공간으로 표현하고 현대제어이론의 적용을 통해 과도상태와 정상상태를 전과정에서 고성능 제어를 할 수 있는 제어입력을 결정하고자 하는 것이다. G.M Liaw와 F.J Lin[2], Yoichi Hori[3]는 산업계전반에서 폭넓게 사용되어 온 PI제어 방법을 이용하여 유도전동기의 속도제어를 연구하였다. 그러나 PI제어방법은 파라미터 변동이나 부하 외란으로 인한 강인성 및 속응성이 결여되는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해서 C.Attaianese와 G.Tomasso[4]는 파라미터 변동이나 부하외란을 고려한 강인한 H_∞설계 방법을 이용하여 유도전동기의 속도추종이 잘 이루어지는 제어기 설계 방법을 연구하였다. 그러나 H_∞를 이용한 설계는 모델의 고차화에 따른 설계과정의 복잡성 및 실현화에 대한 어려움이 있다

본 연구에서는 유도전동기의 속도제어시 속도의 지연과 과도한 오버슈트가 발생하는 문제점을 해결하고 또한 수학적으로도 해석과 설계가 용이한 극점배치기법을 이용하여 PID제어백터를 얻어 일반적인 PI제어시 파라미터의 변동이나 부하외란으로 강인성 및 속응성이 결여되는 문제점을 해결하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 모델링

유도 전동기의 기계적인 방정식은 토크 성분을 기본으로 하여 식(1)과 같다.

$$T_e(t) = T_d(t) + J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \qquad (1)$$

여기서, $T_e(t) = K_e \times i_{sq}^*(t)$ 이므로 식(1)은 식(2)와 같다.

$$K_e \times i_{sq}^*(t) = T_d(t) + J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \qquad (2)$$

그리고 식 (2)를 라플라스 변환하면 식(3)과 같다.

$$K_e \times i_{sq}^*(s) = T_d(s) + (Js + B)\omega(s) \qquad (3)$$

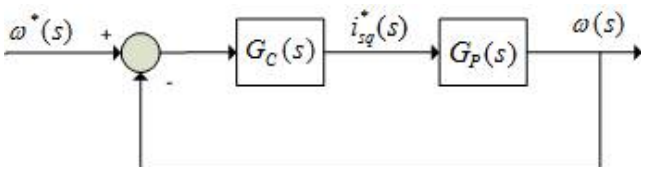
여기서, $T_d(s) = 0$이면 이상적인 플랜트가 설계되고 전달함수는 식(4)와 같다.

$$\frac{\omega(s)}{i_{sq}^*(s)} = \frac{K_e}{Js + B} \qquad (4)$$

이상적인 플랜트에서 고주파가 무시되어진 것을 보상하기 위해 $H = \frac{(as+1)}{(bs+1)}$을 직렬로 곱하면 유도전동기의 공칭 플랜트가 식(5)와 같이 설계된다.

$$G_P(s) = \frac{K_e(as+1)}{(Js+B)(bs+1)} \qquad (5)$$

<그림 1>은 식(5)의 유도전동기의 공칭 플랜트와 속도제어기 $G_c(s)$를 결합한 블록 다이어그램이다.



[그림 1] 폐루프시스템의 블록다이어그램

여기서, $T_e(s)$: 전동기 토크, $T_d(s)$: 부하토크, K_e : 상수, $i_{sq}^*(t)$: 입력전류, $\omega^*(s)$: 입력속도, $\omega(s)$: 출력속도, B : 기계시스템 제동비, J : 회전자 관성 모멘트이다.

2.2 제어기 설계

2.2.1 극점 배치에 의한 설계

유도전동기의 미분방정식은 다음과 같다.

$$a_0\frac{d^2y(t)}{d^2t} + a_1\frac{dy(t)}{dt} + a_2y(t) = b_1\frac{du(t)}{dt} + b_2u(t) \qquad (6)$$

여기서, $a_0 = 1$, $a_1 = \frac{J+Bb}{Jb}$, $a_2 = \frac{B}{Jb}$, $b_1 = \frac{K_e a}{Jb}$, $b_2 = \frac{K_e}{Jb}$이다. $y(t)$는 출력변수, $u(t)$는 제어변수, a_0, a_1, a_2, b_1, b_2는 유도전동기 계수이고 출력변수에 적분요소를 첨가시킨 새로운 상태변수 $x(t)$는 다음과 같다.

$$x(t) = \begin{bmatrix} \int_0^t y(\tau)d\tau \\ y(t) \\ \frac{dy(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \qquad (7)$$

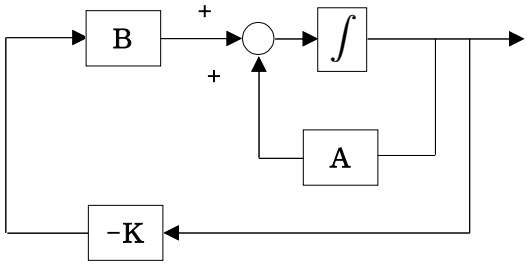
$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \qquad (8)$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{Jb} & -\frac{J+Bb}{Jb} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_e a}{Jb} \\ \frac{K_e Jb - K_e Ja - K_e Bab}{(Jb)^2} \end{bmatrix}$이다.

그리고 최적제어 법칙은 식(9)와 같고 $u(t) = -Kx(t)$를 가진 폐루프 시스템은 <그림 2>와 같다.

$$u(t) = -Kx(t) \qquad (9)$$

여기서, $K = K_1\int_0^t y(\tau)d\tau + K_2y(t) + K_3\frac{dy(t)}{dt}$ 이다.



[그림 2] $u(t) = -Kx(t)$를 가진 폐루프 제어시스템

그리고 식(9)를 식(8)에 대합하면 식(10)과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = (A - BK)x(t) \qquad (10)$$

식(10)의 해는 식(11)으로 주어진다.

$$x(t) = e^{(A-BK)t}x(0) \qquad (11)$$

여기서, $x(0)$은 외적 외란(External Disturbance)에 의한 초기상태이다. 안정도와 과도응답 특성은 행렬

$A-BK$의 고유값에 의하여 결정된다. 행렬 K를 적절히 선택하면 행렬 $A-BK$는 점근적 안정행렬이 될 수 있으며, 0이 아닌 모든 x에 대하여 t가 무한히 커짐에 따라 $x(t)$가 0으로 가게 된다. 이 때 $A-BK$의 고유값을 조정기 극점(Regulator Pole)이라고 하며 이러한 조정기 극점들이 s평면의 왼쪽 반평면에 위치하면, t가 무한히 커짐에 따라 $x(t)$는 0으로 간다. 따라서 극점배치에 대한 제어기 설계는 원하는 위치에 폐루프 극점들을 놓으면 된다.

2.2.2 극점배치 설계순서

식(8)과 식(9)를 가진 <그림 2>의 폐루프 제어시스템에서 $A-BK$의 고유값들을 원하는 값인 μ_1, μ_2, … μ_n이 되게 하는 되먹임 이득행렬 K는 다음의 Step들을 통하여 결정될 수 있다.

Step 1 : 시스템의 가제어성을 확인한다. 이 때 시스템이 완전 상태 가제어이면 Step 2로 넘어간다.

Step 2 : 행렬 A의 특성다항식에서 a_1, a_2, … a_n의 값을 결정한다.

Step 3 : 시스템의 상태방정식을 가제어 정준형으로 변환시키는 변환행렬 T를 결정한다.

$$T = MW \tag{12}$$

$$M = [B \vdots AB \vdots \dots \vdots A^{n-1}B] \tag{13}$$

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

여기서, 식(13)은 가제어성 행렬이다.

Step 4 : 원하는 고유값들(폐루프극점들)을 이용하여 원하는 특성다항식을 얻고 α_1, α_2, … α_n의 값을결정한다.

$$\begin{aligned}(s-\mu_1)(s-\mu_2)\dots(s-\mu_n) \\ = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_{n-1}s + \alpha_n\end{aligned} \tag{15}$$

Step 5 : 필요한 상태 되먹임 이득행렬 K는 식(16)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}K &= [\alpha_n - a_n \vdots \alpha_{n-1} - a_{n-1} \vdots \dots \vdots \alpha_2 - a_2 \vdots \alpha_1 - a_1]T^{-1} \\ &= [K_1\ K_2 \cdots\ K_n]\end{aligned} \tag{16}$$

2.3 Simulation

유도전동기의 설계사양은 [표 1]과 같다.

[표 1] 유도전동기 설계사양과 PID동조계수

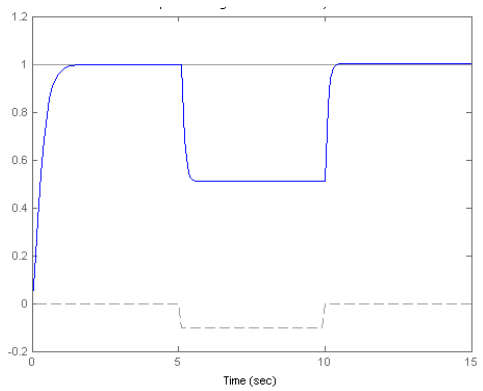
파 라 미 터	단 위	공 칭
K_e	Nm/A	0.746
J	Nms^2/rad	0.0249
B	Nms/A	0.008
a		0.021
b		0.01

본 논문에서 제안한 방법을 통하여 구해진 PID 제어 파라미터는 [표 2]와 같다.

[표 2] PID제어 파라미터

제어 파라미터	Gain
P	3.234
I	1.5517
D	10.414×10^{-4}

<그림 3>은 본 논문에서 제안한 극점배치기법을 이용한 PID제어시스템의 펄스응답곡선을 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 알수 있듯이 운전시부터 5초시의 급제동 또는 제동시 입력속도를 잘 추정함을 확인할 수 있었다. 또한 제안한 제어기 설계방법은 입력속도와 출력속도의 오차를 줄일수 있음을 알 수 있다.



[그림 3] 제안된 제어시스템의 펄스응답

3. 결　　론

본 논문에서는 유도 전동기의 속도제어시 속도의 지연이나 과도한 오버슈트가 발생하는 문제점과 운전시부터 급제동 혹은 제동시 입력속도와 출력속도의 오차를 줄일수 있는 극점배치기법을 이용한 PID 제어기가 설계될 수 있음을 보였다. 따라서, 극점배치기법을 이용한 PID제어기의 설계방법에서 유도전동기의 비선형 특성과 파라미터의 변동과 부하에 대한 외란으로 인한 제어의 어려움을 극점배치 기법을 이용하여 H_∞제어 LQG, 그리고 GA제어 등 설계 방법에서 모델의 고차화에 따른 설계과정의 복잡성 및 실현화에 대한 어려움을 설계상의 간편성과 안정성을 내포하는 극점배치기법을 이용한 PID제어기 설계방법을 통해 개선할 수 그리고 제어기 설계시 설계사양을 만족하고 시행착오방법보다 강인하고 안정적인 설계방법을 제안하였다.

참고문헌

[1] Y.-Y. Tzou, "DSP-Based Robust Control of AC Induction Sevro Drive for Motion Control", IEEE Transactions on Control Systems Technolgy, Vol. 4. No.6, November, 1996.

[2] G.-M. Liaw & F.J. Lin, "A Robust Speed Controler for Induction Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.41, No.3, June, 1994.

[3] Hirokazu Tajima and Yoichi Hori, " Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol.29, PP. 175~180, Jan/Fed, 1993.

[4] C.Ataianese and G.Tomasso, “Field Oriented Control of Induction Motor by means of a H_∞ Controller”, ISIE Proc. Of the IEEE International Symposium on industrial electronics, Vol. 3, pp. 1238~1243, 1999

[5] A. Chu., E.P.Nowicki, T.Chen, “Design of a Robust Controller for a Compressor Driven by a Field Oriented Controlled Induction Motor”, IEEE Canadian Conference on electrical & computer engineering, 1998

[6] Katsuhiko Ogata, Moden Control Engineering, Prentice Hall, Fourth Edition,2001.

[7] 이충우, “유도전동기에서 속도제어를 위한 LQ-PID제어기 설계“, 한양대학교 전기공학과 석사학위논문, 2003