

가상실험실 상에 구현한 BLDC 모터 시스템의 PI 제어기 설계

명노용\*, 백수현\*, 김 용\*, 최정석\*  
\*동국대학교 전기공학과

PI Controller of BLDC Motor System embodied in Virtual laboratory

N.Y.Myoung\*, S.H.Baek\*, Y.Kim\*, J.S.Choi\*  
\*Dongguk University

**Abstract** - In this paper, we made mathematical modeling of BLDC motor system and design of PI controller. Using Apache web-server and PHP web-programming, we embodied virtual laboratory for PI controller design of BLDC Motor system by using proportional constants( $K_p$ ) and constants of integration( $K_i$ ).

1. 서 론

우리사회는 산업사회에서 정보화 사회로 변화되면서 정보가 물가와 에너지와 더불어 경제적 가치를 가지는 사회가 되어가고 있다. 정보화 사회에서는 나날이 늘어나는 정보를 수집, 처리, 가공하는 컴퓨터와 통신의 역할이 중요해지고 있으며, 인터넷은 전송 프로토콜인 TCP/IP를 기반으로 전 세계에 걸쳐 연결된 컴퓨터와 컴퓨터들간에 서로 연결된 조직적이고 체계적인 컴퓨터 통신망 구조 형태이다. TCP/IP란 인터넷에서 정보를 교환할 때 사용하는 약속, 즉 프로토콜이다. TCP/IP 프로토콜에는 개별 프로토콜이 존재하는데, 전자우편을 위한 프로토콜(SMTP), 월드 와이드 웹(WWW)을 위한 프로토콜(HTTP) 등이 있다. HTTP는 월드 와이드 웹에서 웹브라우저를 통해 글, 그림, 데이터 등을 볼 수 있게 해주는 인터넷 통신 규약의 하나이다.

가상실험이라는 개념은 이와 같은 인터넷을 이용하여 다수의 사용자가 실험실에 접속하고, 가상의 물리 시스템을 이용하여 실험 및 시뮬레이션을 수행하면 그 결과가 화면상에 시각화되어 나타나도록 하는 것을 말한다.

본 논문에서는 교육적인 목적뿐만 아니라 공학기술의 목적에도 부합하는 BLDC 모터 시스템의 PI 제어기 설계를 웹기반 가상실험실 상에 구현하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 모터의 모델링 및 PI 제어기 설계

BLDC 모터는 기계적 정류자를 반도체 소자 등을 이용한 인버터로 대체시키고, 주파수를 회전자와 회전자 동기시켜 제어하는, 폐루프를 구성한 자여식 인버터 구동 동기모터로서 속도제어가 용이하며, 효율이 높고, 기동토크가 크며, 소형경량이라는 등 여러 장점을 가지고 있으며, PI 제어기는 개루프 전달함수에  $s = -K_i / K_p$  인 영점과  $s=0$ 인 극점을 추가한 것과 같다. 따라서 PI 제어기는 시스템의 함수를 1차 증가시키므로 시스템의 정상상태 오차가 한 차수만큼 개선된다. 즉 주어진 입력에 대한 정상상태 오차가 상수이면 PI 제어기는 이 정상상태 오차를 0으로 감소시킨다. 이와 같이 정상상태 오차가 감소되는 것이 설계된 PI 제어기를 갖는 시스템이 안정한 경우이다.

2.1.1 BLDC 모터의 수학적 모델링

본 논문에서 가상실험의 제어대상으로 선정한 모터는 일본 TAMAGAWA SEIKI사의 영구자석형 4극 3상 Y결선인 BLDC 모터로서 정격전압은 92V, 정격전류는 0.26A, 30W급으로서, 그림2.1과 같이 세 개의 고정자 권선과 영구자석 회전자로 구성되어 있고, 3상의 각 고정자 권선은 서로 120°의 위상차를 가지고 있다. 또한 BLDC 모터는 회전자가 영구자석으로 되어있기 때문에 회전자에 유도되는 전류(rotor-induced current)를 무시할 수 있다.

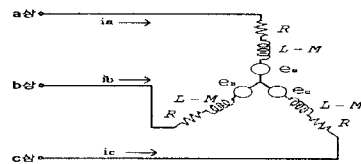


그림 2.1 BLDC 모터의 등가회로

따라서, BLDC 모터의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

여기서, R은 각 상의 고정자 권선 저항으로서 일정하다고 가정하고, L은 각 상의 자기 또는 상호 인덕턴스이며,  $e_a, e_b, e_c$ 는 사다리꼴 형태를 갖고 120°의 위상차를 갖는 BLDC 모터의 역기전력이다. 회전자 위치에 따른 회전자 릴럭턴스(Reluctance)의 변화가 없다고 가정하면,  $L_a = L_b = L_c = L, L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = M$ 이다.

또한,  $i_a + i_b + i_c = 0, M i_b + M i_c = -M i_a$ 이다.

따라서, (식 1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

상태방정식의 형태로 식(2.1.2)를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1.3)$$

그리고 기계적 운동방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_l - B\omega_r \quad (2.1.4)$$

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r \quad (2.1.5)$$

여기서, J는 회전자 관성,  $T_e$ 는 모터에서 발생하는 토크,  $T_l$ 은 부하토크, B는 점성마찰계수,  $\omega_r$ 은 회전자의 각

속도를 나타낸다.

이상적인 전류 파형은 크기가  $I_s$ 인 구형파이며 위상차는  $120^\circ$ 이므로 전류와 크기가  $E_s$ 인 역기전력간에 위상차가 없다고 가정하면 발생토크는 다음과 같다.

$$T_e = 2E_s I_s \omega_r = K_T I_s \quad (2.1.6)$$

역기전력의 크기는 회전자의 각속도에 비례하므로,

$$E_s = K_E \omega_r \quad (2.1.7)$$

여기서,  $K_T$ 는 토크상수,  $K_E$ 는 역기전력 상수를 나타낸다.

식(2.1.4)와 식(2.1.7)에 의해서 기계적 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = (2K_E I_s - T_r - B \omega_r) / J \quad (2.1.8)$$

전체적인 시스템의 상태방정식은 식(2.1.3)과 식(2.1.8)에 의해서 표현될 수 있다.

BLDC 모터의 속도와 입력전압 사이의 전달함수를 얻기 위하여, 상호 인덕턴스를 무시한 다고 가정하고 한 상만을 살펴보면, 식(2.1.3), 식(2.1.4), 식(2.1.6), 식(2.1.7)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L} V_a(t) - \frac{R}{L} i_a(t) - \frac{1}{L} e_a(t) \quad (2.1.9)$$

$$\frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{1}{J} T_e(t) - \frac{1}{J} T_r(t) - \frac{B}{J} \omega_r(t) \quad (2.1.10)$$

$$T_e(t) = K_T i_a(t) \quad (2.1.11)$$

$$e_a(t) = K_E \omega_r(t) \quad (2.1.12)$$

이 시스템에서 상태변수는  $i_a(t)$ 와  $\omega_r(t)$ 로 정의될 수 있다. 식(2.1.9)부터 식(2.1.12)까지에서 모든 비상대변수를 직접 대입하고 제거하여, BLDC 모터 시스템의 상태방정식을 다음의 벡터행렬 형식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -K_E/L \\ K_T/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_a(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \end{bmatrix} T_r(t) \quad (2.1.13)$$

BLDC 모터의 속도와 입력전압 사이의 전달함수는 상태방정식에서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{W_r(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{LJ s^2 + (RJ + BL)s + (K_E K_T + RB)} \quad (2.1.14)$$

여기서,  $T_r(t)$ 는 0으로 가정하였다.

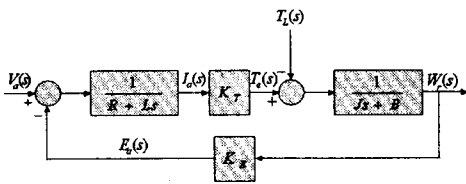


그림 2.2 BLDC 모터 시스템의 블록선도

그림 2.2의 블록선도는 역기전력에 의하여 생긴 내장의 케환루프를 갖고 있음을 보인다. 물리적으로 역기전력은 전동기의 음의 속도에 비례하는 신호의 케환을 나타낸다. 역기전력은 전기마찰과 등가이며 이 전기마찰은 그 전동기의 안정도를, 그리고 일반적으로 계통의 안정도를 개선시키려는 경향이 있다.

정현파 역기전력을 갖는 BLDC 모터는 고정자나 회전자, 또는 동기회전좌표의 상변수들로부터 d-q좌표계로 변환될 수 있으나, 사다리꼴 역기전력을 갖는 BLDC 모터에서는 고정자와 회전자 사이의 상호 인덕턴스도 비정현적이 되므로, d-q 좌표계로의 변환은 쉽게 이루어지지 않는다. 따라서 푸리에 급수를 이용하여 여러 개의 성분으로 분할한 후 d-q 좌표계로 변환할 수 있으나, 변환하기가 복잡하고 변환한다고 해도 얻어지는 이점이 없다.

### 2.1.2 PI 제어기의 설계

PI 제어기를 포함한 페루프 시스템의 블록선도는 그림 2.3과 같이 나타낼 수 있다.

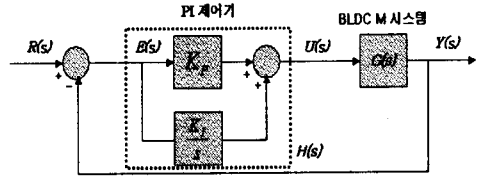


그림 2.3 PI 제어기를 포함한 페루프 시스템

그림 2.3에서 PI제어기에 대한 전달함수  $H(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P s + K_I}{s} = \frac{K_P \left( \frac{s + K_I}{K_P} \right)}{s} \quad (2.1.15)$$

BLDC 모터 시스템의 전달함수를 사용하여 그림 2.3의 PI 제어기를 포함한 개루프 전달함수  $N(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = H(s)G(s) = \frac{K_T(K_P s + K_I)}{LJ s^3 + (RJ + BL)s^2 + (K_E K_T + RB)s} \quad (2.1.16)$$

페루프 시스템의 전달함수  $M(s)$ 는 다음과 같다.

$$M(s) = \frac{K_T(K_P s + K_I)}{LJ s^3 + (RJ + BL)s^2 + (K_E K_T + RB + K_T K_P)s + K_T K_I} \quad (2.1.17)$$

다음의 표 1은 BLDC 모터의 사양이다.

표 1. BLDC 모터의 사양

Item	Symbol	Unit	Spec.
Rated Voltage	$V_T$	V rms	92
Rated Armature Current	$I_a$	A rms	0.26
Torque Constant	$K_T$	Kg-cm/A	4.0
Armature Resistance	R	$\Omega$	120.7
Armature Inductance	L	mH	101.4
Mechanical Inertia	J	$g \cdot cm \cdot s^2$	0.023

이 BLDC 모터 시스템의 설계 사양으로 램프입력에 의한 정상상태오차는 0.1로 하고, 5[%]이내의 최대오버슈트와 0.08[sec] 이내의 정정시간을 갖도록  $K_P$ 와  $K_I$ 의 값의 범위를 아래의 과정을 이용하여 설정하였다.

- ① 주어진 수행기준을 통해서 우세근이 거주할 영역을 s 평면 위에 표시한다.
- ②  $G(s)H(s)$ 의 극점과 영점을 s평면에 표시하고 근궤적 그래프를 그린다.
- ③ PI 제어기의 극점 p를 원점에 놓는다.
- ④ 원하는 극점의 위치에서 각을 계산하므로 PI 제어기의 영점 z를 구한다.
- ⑤ 원하는 극점의 위치로부터 각 극점과 영점까지의 거리를 계산한다.
- ⑥ 설계한 값들을 사용하여 근궤적 그래프를 그려보고, 아울러 스텝응답도 점검한다. 만약 스텝응답이 규격을 만족하지 못하면 ④로 가서 설계를 다시 한다.

### 2.2 웹기반 가상실험실의 구현

아파치 웹서버는 웹서버가 반드시 갖추어야 할 안정성과 퍼포먼스 면에서 다른 웹서버에 비해 훨씬 우수한 성능을 지니고 있으며, 리눅스뿐 아니라 거의 모든 유닉스

기반 운영체제를 지원하며 윈도우 운영체제도 지원한다. PHP는 코딩하기도 편하고, 실행도 빠르다. 동일한 PHP 코드를 전혀 수정하지 않고도 서로 다른 운영체제의 서로 다른 웹 서버 상에서 돌릴 수 있다. 기능도 풍부해서 다른 솔루션에서는 애드 온으로 존재하는 기능들이 PHP에서는 표준 기능으로 존재하는 경우가 많다.

### 2.2.1 아파치(Apache) 웹서버의 특징

아파치(Apache) 웹서버는 1995년 당시 가장 인기 있는 웹서버였던 NCSA httpd 1.3 버전을 기반으로 하고 있으며 그 후 여기에 새로운 기능들을 계속 개발, 수정, 보완하여 "Apache"라는 새 이름으로 탄생하게 되었다. serverwatch.internet.com의 자료에 의하면 신뢰성(Reliability)과 성능(Performance)부분에서는 최고의 점수를 받았고 뉴스그룹, 메일링 리스트, 홈페이지 등을 통해 이루어지는 기술지원부서(Tech Support) 역시 상용제품에 뒤지지 않는 높은 점수를 받았다. 사용 편의성(Ease of Use) 부분은 비교적 낮은 점수를 받았는데 이는 아파치의 설정 파일인 httpd.conf 파일을 편집기로 수정하는 방식을 통해 관리하기 때문에 그래픽 기반의 관리도구에 익숙한 관리자나 처음 웹 서버를 운영하는 초보자는 약간의 어려움을 느낄 수 있기 때문이다. 그렇지만 패치 파일을 통해 지속적으로 성능이 향상된다는 점과 소스가 무료로 공개되는 완전 공개 프로그램이라는 점 때문에 다른 웹서버들 보다 시장점유율이 훨씬 높다.

### 2.2.2 PHP로 구현하는 웹 프로그래밍의 원리

브라우저와 웹서버 사이에서 PHP가 하는 역할을 좀 더 알기 쉽게 설명하기 위해서 PHP의 작동원리를 그림으로 표현하면 그림 2.4와 같다.

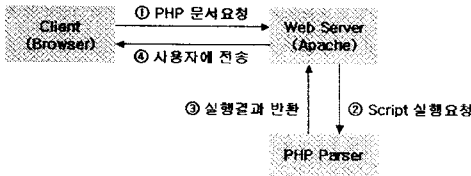


그림 2.4 PHP의 작동원리

사용자가 브라우저를 통해 어떤 사이트에 접속하여 PHP로 만들어진 스크립트 문서를 요청하면 웹서버는 해당 문서가 PHP 스크립트 문서인 것을 확인하고 이것을 PHP Parser에게로 보낸다. 그러면 PHP Parser는 사용자가 폼 양식을 통해 입력한 값과 함께 PHP 스크립트 문서를 번역(Parsing)하여 브라우저에게 볼 수 있는 HTML 문서를 생성해내고 이를 웹서버에게 보낸다. 웹서버는 PHP Parser로부터 번역, 가공된 HTML 문서를 다시 사용자의 브라우저에 전송함으로써 사용자들은 그 결과를 웹 페이지 형태로 볼 수 있는 것이다. 결국 PHP는 사용자의 반응, 즉 폼 양식을 통해 내용을 입력하거나 항목을 선택하는 등의 반응을 받아들여 PHP 스크립트 코드가 포함된 문서를 통해 이를 내부적으로 처리한 후 HTML 문서로 가공하여 웹서버에 전송하는 역할을 하는 것이다. 여기서 내부적으로 처리한다는 것은 사용자가 입력한 값을 가지고 연산을 수행하여 그 결과를 보여주거나 혹은 사용자가 입력한 데이터를 데이터베이스에 저장한 후 그 결과를 출력하는 과정 등을 말한다. 물론 위의 처리과정은 C나 Perl, ASP로 만들어진 CGI 프로그램의 동작원리와 크게 다르지 않다. 그럼에도 PHP가 크게 주목받는 것은 위의 처리과정을 C나 Perl과 같은 다른 개발 도구보다 훨씬 쉽고 수월하게 다룰 수 있도록 지원하는 강력한 기능 때문이다.

그림 2.5는 웹기반에 구현한 가상실험실의 모습을 나타내고 있으며,  $K_p$ 와  $K_i$ 값을 입력할 수 있도록 구성하였고, 그림 2.6은 입력한  $K_p$ 와  $K_i$ 에 의해서 웹 상에서 시뮬레이션이 이루어지는 모습을 도시하였다.

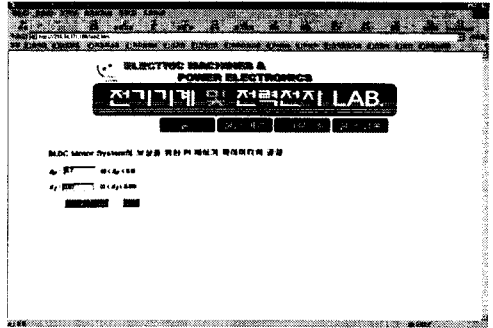


그림 2.5 PI 제어기 파라미터의 입력

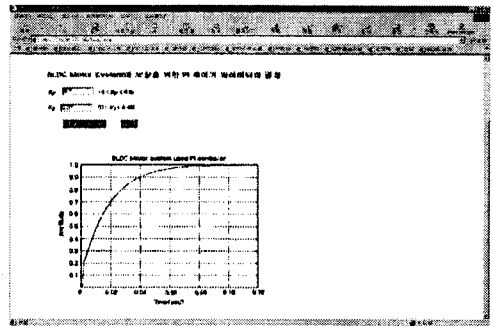


그림 2.6 BLDC 모터의 PI 제어기 시뮬레이션

## 3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터의 PI 제어기의 설계를 웹기반 가상실험실 상에 구현하기 위해서 BLDC 모터의 시스템을 모델링 하였으며, PI 제어를 이론적으로 설계하였다. 이런 모델링 된 값과 설계된 값을 웹기반 하에 적용하기 위해서 아파치 웹서버와 PHP 웹 프로그래밍을 사용하였으며, 인터넷을 이용하는 사용자가 가상실험을 수행하면 PI 제어기의 시뮬레이션의 결과가 웹 브라우저에 시각화되어 나타나도록 구현하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Benjamin C. Cuo, "Automatic control system", Prentice Hall, 7th Edition, 1995
- [2] Bahram Shaian, Michael Hassul, "Control System Design using Matlab", Prentice Hall, 1993
- [3] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, 1998
- [4] 테하메카트로닉스(주), "BLDC Motor Controller 개발 완료 보고서", 1996
- [5] 전자부품종합기술연구소, "고출력 브러시리스 DC 서보 모터 개발에 관한 연구", 1996
- [6] 신춘식 외, "MATLAB과 함께한 제어시스템 해석 및 설계" 동일출판사, 1999
- [7] 이승혁, "PHP 웹 프로그래밍 가이드", 마이트 Press, 2000
- [8] Leon Atkinson, 류 광, "Core PHP Programming", 정보문화사, 2000