

브러시리스 직류 전동기의 기준모델 적응제어에 의한 속도제어

이준환\*, 백수현\*, 맹인재\*, 정일록\*\*, 정계천\*  
 \*동국대학교 전기공학과, \*\*국립환경 연구원 폐기물 연구부

Speed Control of Brushless DC Motor by Model Reference Adaptive Control

J. H. Lee\*, S. H. Baek\*, I. J. Maeng\*, I. R. Chung\*\*, G. C. Jung\*  
 \*Dongguk University, \*\*National Institute of Environmental Research

**Abstract** - The model reference adaptive control(MRAC) algorithm is applied to the speed control of an inverter driven permanent magnet brushless dc motor. MRAC is compared to a standard PI controller. Applying this algorithm has also been proved by simulations that quick speed response without over-shoot could be obtained for the motor system with variable parameters. Simulation results show that the adaptive controller is superior to the PI controller.

1. 서 론

영구자석형 브러시리스 직류(BLDC) 전동기는 브러시 제거에 따른 높은 효율과 높은 전력밀도, 낮은 유지비용 그리고 영구자석재료의 성능향상으로 널리 보급되고 있다. 고도의 정밀성을 요하는 전동기에서는 지령 값에 대한 빠른 속응성과 정상상태 오차가 없는 서보 시스템이 요구된다. [1] 시스템의 서보성을 높이는 방법으로는 시스템을 정확히 모델링하여 제어기를 설계하여야 한다. 제어기 설계에 있어서 PI제어기는 제어 정수 값이 적절히 선정될 경우에는 좋은 운전 특성을 얻을 수 있고 외란 입력에 대응할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 속도 제어시 부하관성, 마찰의 변화, 온도상승에 의한 저항변화 등에 의해서 제어대상의 동특성과 제어시스템의 파라미터는 변동하는 단점이 있다. [2]

이러한 이유 때문에 파라미터 변동에 적응할 수 있는 제어방식이 요구되고 있다.

본 연구에서 사용된 기준모델 적응제어는 원하는 동작 특성을 갖는 기준 모델을 설정한 후 기준모델의 출력과 플랜트 출력사이의 오차를 최소화하도록 제어기 파라미터를 조절하는 제어기법으로 Lyapunov의 안정성 이론에 기초하여 적응 규칙(Adaptation Law)을 전개하였다.

BLDC 전동기의 근사화 1계 모델링을 기초로 MRAC (Model Reference Adaptive Control)의 기법을 이용했으며, 그 특징을 강조하기 위해 부하 관성 변동시 PI제어와 속도응답을 비교하였다. 부하 관성에 따른 플랜트의 출력이 기준모델에 적응함을 보였으며, 두 출력의 시간에 따른 오차 변동을 알아보았다. 또한 제어기의 파라미터의 변동과 수렴에 관해 시뮬레이션을 통하여 구체화하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

그림1은 BLDC 전동기의 전기계와 기계계를 모델링한 전체 시스템의 블록도이다.

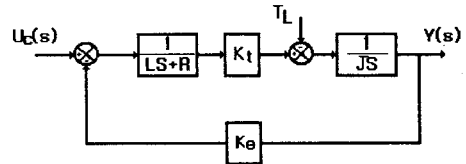


그림 1. BLDC 전동기의 전체 시스템 블록도

그림1에서 입력전압  $U_c(s)$ 에 대한 출력속도  $Y(s)$ 는 식(1)로 표현한다.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U_c(s)} = \frac{1/K_e}{(s\tau_e + 1)(s\tau_m + 1)} \quad (1)$$

$K_e$ : 역기전력상수,  $\tau_e$ : 전기적 시정수,  $\tau_m$ : 기계적 시정수

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2)$$

$$\tau_m = \frac{JR}{K_e K_t} \quad (3)$$

일반적인 제어기 설계시 시스템의 전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 작으므로 전기적인 동특성을 무시한다면 2계인 식(1)은 1계인 식(4)로 근사화 할 수 있다. 그림2는 그림1을 간략화한 블록도이다.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U_c(s)} = \frac{K_t / JR}{s + (K_e K_t / JR)} \quad (4)$$

$K_t$ : 토오크상수

$J$ : 관성모멘트

$L$ : 인덕턴스

$R$ : 저항

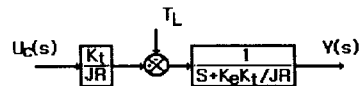


그림 2. BLDC 전동기의 1계 근사화 블록도

2.2 기준모델 적응제어기 설계

1계로 간략화한 전달함수는 식(5), 식(6)과 같은 상태방정식으로 표현 할 수 있다.

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) \quad (5)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t) \quad (6)$$

여기서  $x_p(t), u(t), y_p(t)$ 는 각각 상태변수, 제어입력, 플랜트 출력을 나타낸다.

$$G_p(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)} \quad (7)$$

식(5), 식(6)에 의해서 출력  $y_p(t)$ 는 속도를 나타내고 적응 제어 입력  $u(t)$ 는 전압을 나타낸다. 또 식(4)와 식(5), (6)를 비교하여 식(8), 식(9)와 같은  $A_p, B_p$ 를 구할 수 있다.

$$A_p = -\frac{K_e K_t}{JR} \quad (8)$$

$$B_p = \frac{K_e}{JR} \quad (9)$$

$G_p(s)$  다음과 같이 주어진다.

- i)  $R_p(s)$ 는 차수  $n$ 의 monic 다항식이다.
- ii)  $Z_p(s)$ 는 차수  $m (\leq n-1)$ 의 monic Hurwitz 다항식이다.
- iii)  $k_p$ 의 부호는 알고 있다.

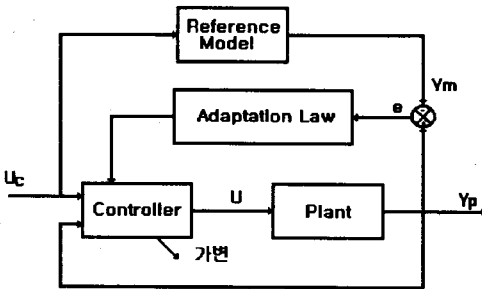


그림 3. MRAC의 블럭도

기준 모델의 상태방정식은 식(10), 식(11)과 같다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_c(t) \quad (10)$$

$$y_m(t) = C_m x_m(t) \quad (11)$$

이때 기준 모델은 SPR(strictly positive real)의 조건을 만족하는 전달함수가 선택된다.

$$G_m(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{R_m(s)} \quad (12)$$

$G_m(s)$ 는 다음과 같이 주어진다.

- i)  $R_m(s)$ 는 차수  $n$ 의 monic Hurwitz 다항식이다.
- ii)  $Z_m(s)$ 는 차수  $p (\leq m)$ 의 monic Hurwitz 다항식이다.
- iii)  $k_m$ 은 상수이다.

제어 목적은 식(5), 식(6)으로 주어지는 플랜트의 출력이 식(10)과 식(11)의 기준 모델의 출력을 추종하여 오차( $e$ )를 0으로 수렴할 수 있도록 적응 제어 입력  $u(t)$ 를 결정하는 것이다.

$$e = y_p(t) - y_m(t) \quad (13)$$

이 목적을 달성하기 위해 식(14)로 주어지는 제어기를 고려한다.

$$u(t) = \hat{a}_r(t) u_c + \hat{a}_y(t) y \quad (14)$$

제통의 외란이 없는 경우 제어기를 포함한 전체 시스템의 전달함수와 모델의 전달함수를 일치시키기 위한 제어기 파라미터  $\hat{a}_r, \hat{a}_y$ 가 존재한다.  $\hat{a}_r, \hat{a}_y$ 는 미지이므로 이를 최적의 값에 수렴시키기 위해 Lyapunov등은 식(15)와 같은 적응 규칙(adaptation law)을 사용하였다.

Lyapunov 함수는 식(15)와 같다.

$$V(e, \hat{a}_r, \hat{a}_y) = \frac{1}{2} [e^2 + \frac{1}{B_p \gamma} (B_p \hat{a}_y + A_p - A_m)^2 + \frac{1}{B_p \gamma} (B_p \hat{a}_r - B_m)^2] \quad (15)$$

$\gamma$  : 적응 이득

오차( $e$ )가 0이고 제어기 파라미터  $\hat{a}_r, \hat{a}_y$ 가 최적의 값에 적응 규칙(Adaptive Law)에 의해 수렴할 때 식(15)는 0이다.

오차( $e$ )와 제어기 파라미터  $\hat{a}_r, \hat{a}_y$ 가 점근적으로 안정하기 위한 충분조건은 식(16)을 만족할 때이다.

$$\frac{dV(e, \hat{a}_r, \hat{a}_y)}{dt} < 0, (e \neq 0 \text{인 동안}) \quad (16)$$

식(16)에 의해서 식(17)과 식(18)의 적응 규칙(adaptation law)을 얻는다.

$$\frac{d\hat{a}_r}{dt} = -r u_c e \quad (17)$$

$$\frac{d\hat{a}_y}{dt} = r y e \quad (18)$$

식(17)과 식(18)이 만족될 때 식(16)은 결과적으로 식(19)가 되므로  $e$ 와  $\hat{a}_r, \hat{a}_y$ 는 점근적으로 안정하다.

$$\frac{dV}{dt} = -A_m e^2 \quad (19)$$

본 시뮬레이션에서 적용한 BLDC 전동기의 파라미터는 표1과 같다.

표1. 전동기 파라미터

파라미터	값	단위
선간인덕턴스(L)	10	mH
선간 저항(R)	3	$\Omega$
관성모멘트(Jm)	$1.8 \times 10^{-3}$	$kgm^2$
역기전력상수(Ke)	0.142	Vs/rad
토크상수(Kt)	0.142	Nm/A

### 2.3 시뮬레이션

BLDC 전동기의 모델을 이용하여 MRAC와 PI제어에 적용할 때 관성 모멘트 J를 2가지 값으로 변화시켜 응답특성을 평가하였다.

조건 A :  $J = 0.0018 \text{ kgm}^2$

조건 B :  $J=0.0036 \text{ kgm}^2$

전동기의 속도제어에서 MRAC를 적용하여 전동기의 설정속도를 0(rpm)에서 1000(rpm)까지 증가시켰을 때 기준 모델과 조건A, 조건B의 응답 파형은 그림4, 그림5와 같다. 전동기 속도제어에 MRAC방법을 적용했을 때 속도응답이 그림4, 그림5에서와 같이 기준모델을 두 조건 모두에서 잘 추종함을 보였다. 한편 MRAC와 같은 조건하에서 PI제어만의 속도응답은 그림7과 같은 응답을 얻을 수 있는데 조건A에서는 정정시간(settling time)은 대략 800(msec)로 MRAC와 거의 같으나 조건B에서는 PI제어가 약간의 오버-슈트가 있음을 그림7에서 보여주고 있다. 그림6은 조건A와 조건B에서의 기준모델의 출력과 플랜트의 출력사이의 오차(e)를 나타내며, 그림8은 조건A, 조건B에서 제어기 파라미터  $\hat{a}_r$ ,  $\hat{a}_y$ 의 추적과정을 보여주고 있다. 이상의 두 종류의 제어방식을 비교하여 볼 때 MRAC에 의한 속도제어가 제어시스템의 파라미터 변화에 적응 보상하는 효과가 있음을 알 수 있다.

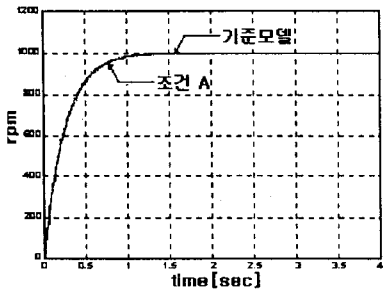


그림 4. 기준모델과 플랜트의 속도응답 비교 (조건 A)

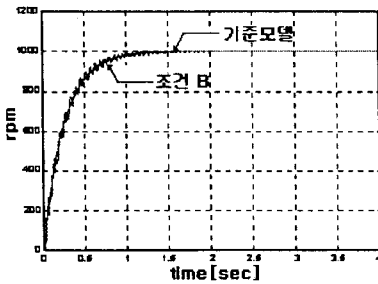


그림 5. 기준모델과 플랜트의 속도응답 비교 (조건 B)

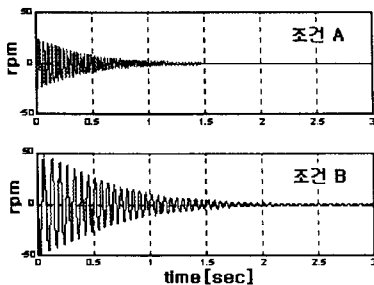


그림 6. 기준모델 출력과 플랜트 출력의 오차

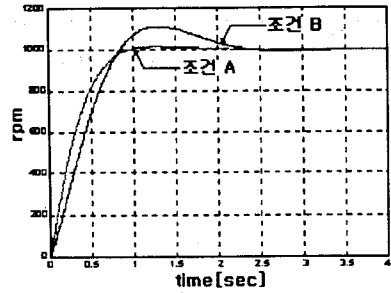


그림 7. PI제어에 의한 속도응답

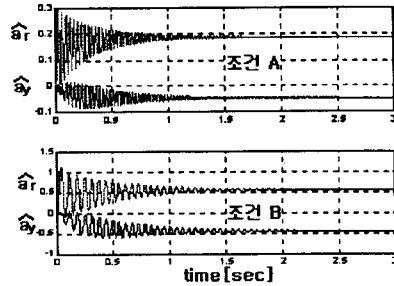


그림 8. 제어기 파라미터 추적

### 3. 결 론

본 논문은 BLDC 전동기의 속도응답에 있어서 전동기의 관성모멘트 변화에 MRAC방식을 적용하여 동특성이 개선됨을 알 수 있었다. 또한 이 동특성을 PI제어와 비교하여 기준 모델 적응제어가 파라미터 변동에 우수한 적응성을 보이며 오버-슈트가 없는 응답을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 가변속 속도 제어와 chattering 현상을 줄이는 연구가 차후 수행되어야 할 부분이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Y. Sozer & H. Kaufman, "Direct Model Reference Adaptive Control of Permanent Magnet Brushless DC Motors", IEEE International Conference on Control Applications, pp.633-638, 1997
- [2] Y. Dote & S. Kinoshita, "Brushless Servomotors", Oxford, 1990
- [3] J.J. E. Slotine & W. Li, "Applied nonlinear control", Prentice-Hall, 1991
- [4] K. J. Åström & B. Wittenmark, "Adaptive control", Addison Wesley, 1989
- [5] S. sastry & M. Bodson, "Adaptive control", Prentice-Hall, 1989
- [6] J. R. Hendershot Jr & T.J.E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Oxford Magna Physics, 1994