

자성체의 방향 우선 제어를 위한 전류 지령 보정법 및 PI 전류 제어기 이득 설정

이준, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Current Reference Adjustment Method and PI Current Controller Gain Selection for Direction Priority Control of Magnetic Agent

Jun Lee, Jung Ik Ha
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

이 논문은 자성체 주변에 자기장과 자기장 기울기를 형성하여 자성체의 위치와 각도를 제어하는 자기장 제어 시스템을 위한 제어법을 제안한다. 자기장 제어 시스템을 구성하는 각 코일은 전류 제한 아래 동작하게 되는데 만약 각 코일이 독립적으로 제한되는 경우 합성된 자기장이 주어진 지령과 달라져 자성체의 정렬 및 병진운동 방향이 잘못 제어될 수 있다. 이 논문은 이를 방지하여 방향 우선 제어를 수행하기 위한 비례 전류 지령 보정법을 제안한다. 이와 함께 전압 제한으로 인해 발생할 수 있는 자성체의 과도기 방향 제어 오류를 방지하기 위한 PI 전류제어기 이득 설정 방법을 제안한다. 제안된 전류 지령 보정법의 유효성은 실험을 통해 확인되었다.

1. 서론

많은 전기기기는 동작의 영역이나 자유도가 꽤나 제한된 상태에 있다. 이러한 제한을 벗어나는 연구로 자성체의 위치와 각도에 6자유도를 갖게 하는 자기장 제어 시스템이 연구되고 있다. 자성체 제어를 위한 다양한 연구가 이루어지고 있는데 이들 중 다수는 체내 정밀 의료용으로 개발하고 있다. 이 때 자성체는 정밀하게 제어가 될 필요가 있는데 가장 기본이 되는 요건은 방향 유지 제어이다. 이를 위하여 전류 제한 내에서 여러 형태의 자기장 시스템이 합성할 수 있는 자기장에 대한 분석이 이루어졌다[2]. 그러나 전류 제한으로부터 자성체의 동작 영역을 계산하는 것은 안전하지 못함에도 이는 전류 지령이 힘과 토크 지령으로부터 계산을 통해 얻어지기 때문이다. 따라서 자기장 제어 시스템은 전류 제한을 넘는 전류 지령이 주어지는 경우 이를 적절히 보정하여 방향 우선 제어를 수행하는 능력을 갖고 있어야 한다. 마찬가지로 전압 제한이 각 코일에 있는 경우 과도기에서 자성체는 예상치 못한 방향으로 정렬되거나 움직이는 동작을 보일 수 있는데 이를 방지하기 위한 제어기 이득 설정 방법을 제안한다.

2. 자성체의 방향 우선 제어를 위한 제어기 설계

2.1 비례 전류 지령 보정법

여러 개의 코일을 사용하여 자성체에 힘과 토크를 인가하는 방법에 대한 연구는 앞선 연구를 참고하였다[1]. 자성체는 자기장 기울기에 의해 힘을 받으며 자기장의 방향으로 정렬되려는 토크를 받는다. 정확한 힘과 토크를 인가하기 위한 전류 지령

은 다음의 수식을 통해 얻는다.

$$I = A_{T,F}(M, P) + \begin{bmatrix} T \\ F \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 $A_{T,F}$ 는 actuation matrix로 전류가 생성하는 힘과 토크를 계산하기 위한 행렬로 자성체의 자기 모멘트(정렬방향) M 과 자성체의 위치 P 에 의존한다.

만약 몇 전류 지령이 전류 제한보다 크게 얻어져 각각의 인버터 보드에서 전류 제한 값으로 줄여 수행을 한다면 자기장은 전류의 크기에 비례하므로 합성되어진 자기장과 자기장 기울기는 의도된 값과 다르게 될 것이다. 이는 자성체의 병진운동과 정렬된 방향을 다르게 하기 때문에 의도된 목적을 갖는 자성체의 제어에서는 치명적인 문제가 된다. 이 논문에서는 제어 성능(힘과 토크의 크기)을 감소시키지 방향의 왜곡이 없는 비례 전류 지령 보정법에 의해 수행될 수 있다. 이는 주어진 전류 지령 중 가장 큰 값이 전류 제한을 넘는 경우 두 값 사이의 비율을 모든 전류 지령에 곱하는 방법이다. 그림 1은 비례 전류 지령법이 적용된 경우와 각각의 인버터가 따로 전류 지령을 제한한 경우를 비교한 예를 비교한다.

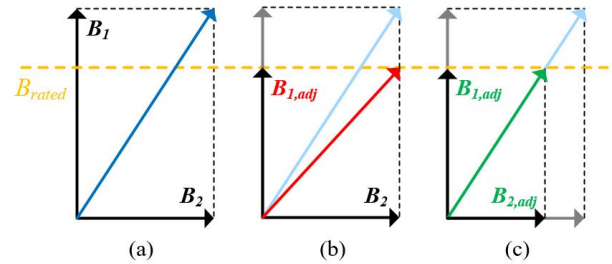


그림 1 (a) 주어진 자기장 지령 (b) 지령 보정이 없이 제한되어 합성된 자기장 (c) 비례 전류 지령 보정법을 적용하여 합성된 자기장
Fig. 1 (a) Given magnetic field reference (b) magnetic field synthesized without reference adjustment (c) magnetic field synthesized with proportional reference adjustment

비례 전류 지령 보정법의 유효성을 실험적으로 확인하기 위하여 8 코일 시스템을 제작하였다. xy 평면으로부터 아래로 29도 기울은 코일, 61도 기울은 코일을 4 개씩 번갈아 등 간격으로 배치하였다. 여기에 단위 전류를 흘려 측정된 자기장과 그 기울기는 표 1과 같다. 표 1을 사용하여 자성체에 5 mT의 y방향 자기장을 인가하여 정렬시키며 39.2 μ N의 x방향 힘과 19.6 μ N의 y방향 힘이 인

가 되도록 제어하였다. (힘 지령의 x:y 비율이 2:1이다.) 각각의 인버터가 전류 제한을 적용한 경우와 비례 전류 지령 보정을 하여 자기장을 합성한 경우의 결과는 그림 2와 같다. 각 인버터가 독립적으로 제어된 경우 y방향 자기장을 생성하며 x방향 자기장 기울기를 생성하는 역할의 전류가 제한에 의해 감소되어 1.5:1 방향으로 움직이게 되었다.

표 1 두 종류의 코일에 단위 전류를 흘려 측정한 자기장과 기울기
Table 1 Magnetic fields and gradients of two types of coils flowing unit current

[T, T/m]	x component	y component	z component
B_{29}	1.92	0	0.229
$\partial B_{29}/\partial x$	80.0	0	17.7
$\partial B_{29}/\partial y$	0	20.0	0
$\partial B_{29}/\partial z$	12.0	0	120
B_{61}	0.55	0.55	1.80
$\partial B_{61}/\partial x$	90.0	22.0	45.0
$\partial B_{61}/\partial y$	22.0	90.0	45.0
$\partial B_{61}/\partial z$	50.0	50.0	240

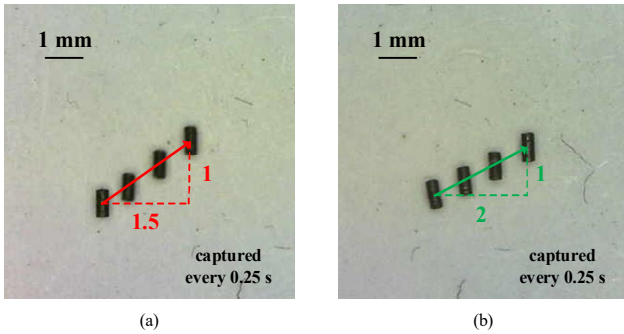


그림 2 (a) 각 인버터가 전류 제한을 적용한 경우 (b) 비례 전류 지령 보정법인 적용된 경우

Fig. 2 (a) Result with conventional current limiting (b) result with proportional current reference adjustment

2.2 전압 제한을 고려한 PI 전류 제어기 이득 설정

전류 제어 주파수를 높게 설정하거나 직류단 전압으로 인하여 전류 제어기가 생성한 전압 지령에 제한이 생길 수 있다. 이 경우 각 전압 지령이 각 제어기에서 제한되어 수행되는 경우 과도기 동작이 예상된 것과 다르게 나타날 수 있다. 이러한 문제가 있을 경우 앞과 같은 비례 지령 보정을 적용하면 과도기의 동작이 전압 제한이 없는 경우와 같아지게 된다. 하지만 가장 좋은 제어 방식은 전압 제한이 발생하지 않도록 하는 것이고 이는 PI 전류 제어기 이득을 설정하는 것으로 해결된다.

위 자기장 제어 시스템의 각 코일은 저항(R)과 유도기(L)의 직렬 연결로 모델링 될 수 있다. 이의 전류 제어를 하는 데에는 PI 전류 제어기가 사용될 수 있다. 이 때 close loop에서 zero가 생성되지 않도록 P, I 이득을 설정해야 전류 제어가 안정적이 된다. $K_p = \omega_c L$, $K_i = \omega_c R$ 를 선택하면 ω_c 의 대역폭을 갖는 1차 low pass 필터 특성의 전류 제어기를 만들 수 있다.

이와 같은 PI 제어기를 갖는 전류 제어 시스템에서 I_{rated} 이 내의 전류를 제어할 때 가장 큰 전압이 필요한 경우는 전류 지령이 $-I_{rated}$ 에서 $+I_{rated}$ 로 바뀔 때 이다. $t=0$ 에서 이처럼 지령이 바뀔 때 생성된 전압 지령은 다음과 같다.

$$V(t) = I_{rated}(R + 2(\omega_c L - R)e^{-\omega_c t}) \quad (2)$$

식 (2)를 미분해보면 $\omega_c L > R$ 인 경우 단조감소 함수로 전류 지령이 바뀔 직후 $V_{max} = (2\omega_c L - R)I_{rated}$ 의 최대 전압이 인가됨을 알 수 있다. 반대로 $\omega_c L < R$ 인 경우는 단조증가 함수가 되는데 그 값이 $V_{max} = RI_{rated}$ 로 수렴하고 이 값이 최대 전압이 된다. $I_{rated} = 100A$, $R = 0.1\Omega$, $L = 1mH$ 의 시스템에서 제어주파수의 변화에 따른 최대 전압 지령 값은 그림 3과 같다.

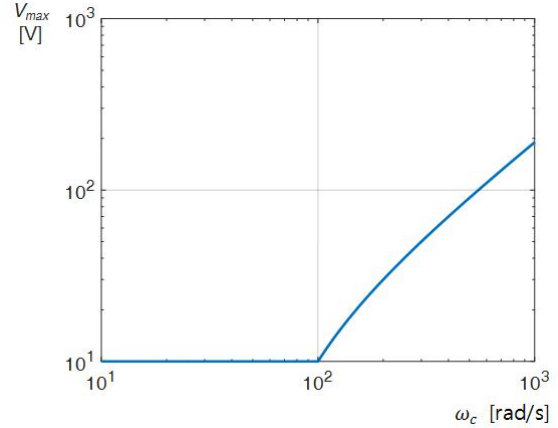


그림 3 제어주파수 변화에 따른 전류 제어기 전압 출력 최대값
Fig. 3 Maximum output value of current controller against the control frequency

위의 내용을 바탕으로 직류단 전압을 만들어 사용할 수 있고 혹은 직류단 전압이 정해져 있다면 사용할 수 있는 최대 제어 주파수를 설정할 수 있다.

3. 결론

이 논문은 여러 코일의 전류를 사용하여 자성체의 위치와 각도를 제어하는 시스템을 위한 지령 보정법이 제안되었다. 여러 전류 지령 중 몇 개의 지령이 시스템의 제한 값을 넘는 경우 비례 전류 지령 보정에 의해 주어진 것과 같은 방향의 힘과 토크 지령이 수행됨을 실험적으로 확인하였다. 이와 함께 인버터의 전압 지령이 시스템의 제한 값을 넘지 않도록 할 수 있는 전류 제어기 이득 설정법이 제안되었다.

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 로봇산업융합핵심기술개발사업에 의해 수행됨(10052980).

참고 문헌

- [1] M. P. Kummer, J. J. Abbott, B. E. Kratochvil, R. Borer, A. Sengul, and B. J. Nelson, "OctoMag: An Electromagnetic System for 5 DOF Wireless Micromanipulation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 6, pp. 1006–1017, Dec. 2010.
- [2] S. Schuerle, S. Erni, M. Flink, B. E. Kratochvil, and B. J. Nelson, "Three Dimensional Magnetic Manipulation of Micro and Nanostructures for Applications in Life Sciences," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, pp. 321–330, Jan. 2013.
- [3] J. Lee and J. I. Ha, "Control method considering current and voltage limits in magnetic manipulation systems," in *2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2015, pp. 1–5.