

# 다중 코일 자기장 합성 시스템에서의 RMS 전류 제한방법

서정준, 홍진수, 하정익  
 서울대학교 전기정보공학부

## RMS Current Limitation Method in Multi-Coil Magnetic Manipulation System

Jeongjun Seo, Jin-Su Hong, Jung-Ik Ha  
 School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문은 다중 코일 자기장 합성 시스템에서 RMS 전류를 제한하는 방법을 제안한다. 해당 방법은 기존의 전류 지령의 위상을 바꾸지 않으면서 전류 지령의 크기를 줄여 RMS 전류가 원하는 범위를 넘어가지 않도록 한다. 또한 해당 방법은 자기장 합성 시스템의 특성을 고려하여, 일부 전류 지령이 제한되는 경우에 다른 전류 지령들도 같은 비율로 줄여주는 방법을 포함한다. 제안된 방식을 적용하게 되면 RMS 전류 지령이 정격을 넘을 때에만 전류를 제한하여 일반적인 상황에서 과도하게 전류를 제한하는 것을 개선할 수 있다.

### 1. 서론

최근 전력전자 기술과 자성소재의 발달로 소형 자성체(이하 마이크로로봇)를 인체에 주입하고, 자기장을 이용해 마이크로로봇의 방향과 힘을 제어하여 의료시술 등에 활용하려는 시도가 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 마이크로로봇을 제어하는 자기장은 인체 밖에 존재하는 코일에 흐르는 전류를 제어함으로써 형성된다. 특정한 위치의 자기장의 방향을 제어함으로써 마이크로로봇의 방향을 제어할 수 있고, 자기장 세기의 위치변화량을 제어함으로써 마이크로로봇에 가해지는 힘을 제어할 수 있다. 특정한 위치의 자기장의 방향과 위치변화량을 제어하기 위해서는 여러 개의 코일에 흐르는 전류를 독립적으로 제어할 수 있어야 한다.

만약 어떤 코일에 흐르는 전류를 제한하여야 하는 상황이 발생하면 제한된 전류로 인해 자기장 합성이 제대로 이루어지지 못할 가능성이 존재한다. 이 때 다른 코일에 흐르는 전류도 같은 비율로 줄여주면 마이크로로봇의 속도는 늦어지더라도 원하는 제어를 달성할 수 있다<sup>[2]</sup>.

코일에 흐르는 전류를 제어하기 위해서는 풀 브리지 회로를 사용해야 하는데, 회로에 들어가는 소자들의 정격에 의해 제어할 수 있는 전류의 정격이 정해지게 된다. 많은 경우 소자들의 전류 정격은 전류로 인한 소자의 발열과 관련성이 높다. 따라서 RMS(Root Mean Square) 전류를 제한함으로써 회로의 전류 정격을 보장할 수 있게 된다. 기존의 다중 코일 자기장 합성 시스템에서는 모든 상황에서 전류 지령의 RMS

값이 소자의 정격을 넘지 않도록 설계하였다. 하지만 위 방법은

과도하게 정격을 제한하여 동작 영역이 낮아지거나 정격을 증가시키기 위해 시스템의 비용이 증가하는 단점이 있다. 따라서 RMS 전류가 정격을 넘어갔을 경우에만 제한한다면 기존의 단점들을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 다중 코일 자기장 합성 시스템에서 RMS 전류가 제한 값을 넘어갔을 경우 RMS 전류를 제한하고, 다른 코일에 흐르는 전류도 같은 비율로 줄여 마이크로로봇의 제어를 유지하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 검증하도록 한다.

### 2. 다중 코일 자기장 합성 시스템의 RMS 전류 제한 알고리즘

RMS 전류 제한 알고리즘의 코일 하나에 대한 블록선도는 그림1과 같다. RMS 전류 계산은 LPF(Low Pass Filter)로 수행하였고, 2.1절에 설명하였다. 다중 코일 자기장 합성 시스템에서 어떤 코일에 흐르는 전류가 제한될 때 다른 코일에 흐르는 전류도 같은 비율로 줄여들도록 코일마다 slope 변수를 정의한다. Slope는 0과 1 사이의 값을 가지는 변수로 PI 제어기의 출력 값을 기준으로 변화한다. 여러 개의 slope 중 가장 작은 값으로 모든 코일의 전류 지령을 곱해 RMS가 제한된 전류 지령을 만들어내도록 하였다. 출력 전류 지령이 과도하게 변하는 것을 막기 위해 slope LPF도 추가하였고 2.3절에 설명하였다. 전류 지령은 1초안에 RMS 전류를 제한할 수 있도록 디자인하는 것을 목표로 하였다.

Peak 전류 제한은 200A, RMS 전류 제한은 100A로 가정하였고, RMS 전류 값을 계속해서 측정하다가 RMS 전류 제한을 넘게 되면 알고리즘을 동작시켜 제한 값으로 수렴하도록 구현하였다. 샘플링 시간은 1ms로 가정하였다.

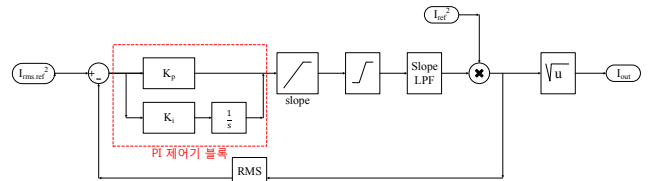


그림 1 RMS 전류 제한 알고리즘 블록선도

#### 2.1 RMS 전류 계산

RMS 전류를 계산하기 위해 평균을 내는 알고리즘은 디지털 IIR(Infinite Impulse Response) 필터로 구현하였다. RMS 전류 제한은 소자의 발열을 제한하는데 주요한 목적이 있으므로 과거의 RMS 값에 영향을 크게 받는다. 따라서 이전의 RMS 값을 반영하기 위해 피드백을 가지는 IIR 필터를 구현하였고, 이전의 RMS 값을 충분히 반영하도록 설계하였다. 기본적인 IIR 필터의 식은 다음과 같다.

$$y[n + 1] = a \times y[n] + b \times x[n] \quad (1)$$

$$b = 1 - a, \frac{1}{f} = \frac{T_{s\text{amp}}}{b} - T_{s\text{amp}} (f \text{는 차단주파수}) \quad (2)$$

## 2.2 PI 제어기

RMS 전류를 제한 값으로 수렴시키기 위해 PI 제어기를 구현하였다. PI 제어기의 이득은  $K_i = \frac{K_p}{10}$  으로 정했다.  $K_p$  를 크게 설계하면 반응성이 빨라지지만 맥동이 생기고 overshoot이 커지게 되므로 trade-off해서 적절한  $K_p$  를 선정하여야 한다.

## 2.3 slope LPF

전류 제한 알고리즘은 RMS 값이 제한 값을 넘는 순간부터 작동하게 된다. 이 때 slope 값이 RMS 전류 값에 비해 너무 빠르게 반응하기 때문에 아웃풋 전류에 overshoot이 크게 일어난다. 따라서 slope에도 IIR 필터를 구현하여 RMS 전류 값에 비해 너무 빠르게 반응하지 않도록 하였다. 또한 이것으로 높은 주파수에서 기존 전류 지령의 파형이 크게 왜곡되는 것을 막을 수 있다. Slope LPF 때문에 제어기의 반응성이 느려지는 것을 막기 위해 Slope LPF는 RMS LPF보다 충분히 빨라야 한다.

## 2.4 시뮬레이션

표 1 선정된 PI 제어기 게인 및 LPF 차단주파수

$K_p$	0.002
$K_i$	0.0002
$f_{\text{slope LPF}}$	10rad/s
$f_{\text{RMS LPF}}$	0.1rad/s

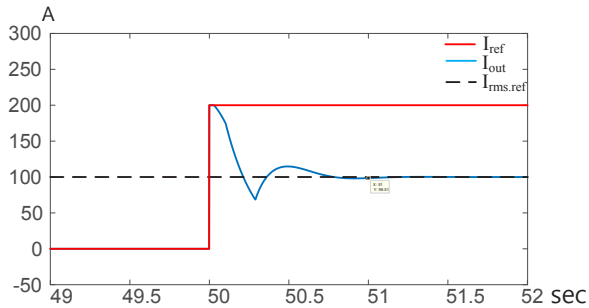


그림 2 DC 전류 지령에 대한 RMS 제한 전류 지령

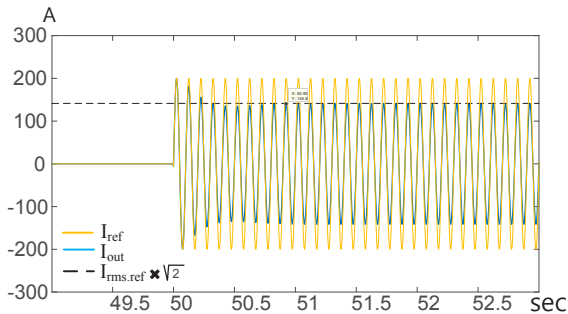


그림 3 AC 전류 지령에 대한 RMS 제한 전류 지령

제한된 알고리즘을 검증하기 위해서 Matlab® 시뮬레이션을 수행하였다. 제어기의 반응속도가 가장 느린 상황이 RMS 전류 값이 0일 때이므로 전류 지령을 주지 않고 있다가 50초에 주는 방식으로 테스트하였다. 그리고 순간적으로 들어오는 전류 지령이 클수록 RMS 전류 제한에 걸리는 시간이 증가하므로 가장 큰 조건인 전류 지령

200A에서 시뮬레이션 하였다.

표2 단일 코일 시뮬레이션 변수 및 결과

	DC 전류 지령(그림 2)	AC 전류 지령(그림 3)
$I_{\text{rms.ref}}$	100A	100A
$I_{\text{ref}}$	200A	$200\sin(2\pi \times 10t)$ A
$I_{\text{out}}(t)$	98.53A (t=51s)	140.6A (t=50.93s)
Error	1.47%	0.58%

그리고 다중 코일 자기장 합성 시스템에서 각각의 코일에 같은 비율로 전류가 줄어드는 것을 검증하기 위해서 PLECS 시뮬레이션을 수행하였다. RMS 제한은 100A로 하였고, 200A, 100A 두개의 DC 지령과 25A~150A까지 25A 단위의 6개의 AC 지령을 주었다. 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같으며, RMS 전류가 잘 제한되고 하나의 지령이 제한되는 만큼 다른 지령들도 같은 비율로 제한되는 것을 확인할 수 있다.

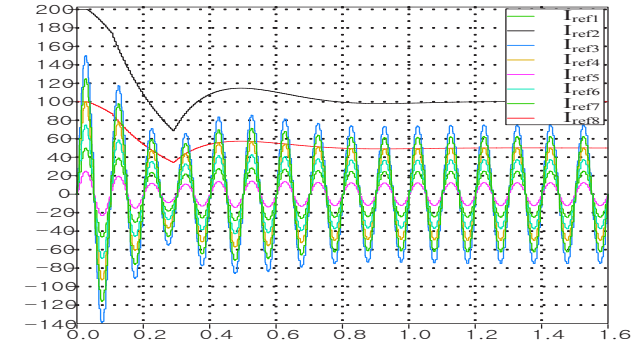


그림 4 다중 전류 지령에 대한 RMS 제한 전류 지령

## 3. 결론

본 논문에서는 다중 코일 자기장 합성 시스템에서 각각의 입력 전류 지령의 RMS 값을 제한하고 제한한 비율만큼 다른 코일의 전류 지령도 줄여주는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 통해 코일에 흐르는 RMS 전류를 제한할 수 있고 같은 비율로 다른 코일도 줄임으로써 자기장 합성이 안정적으로 이루어지도록 한다. 따라서 전류 정격을 키우지 않고도 시스템의 운전 영역을 넓히고, 전류 정격을 초과하는 위험한 상황에서는 지령을 제한해 안정적으로 시스템을 제어할 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 로봇산업융합 핵심기술개발사업에 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, 2010.
- [2] Lee, J. and J. Ha, "Direction Priority Control Method for Magnetic Manipulation System in Current and Voltage Limits." IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 4, pp. 2914-2923, 2017.