

포화 함수 기반 슬라이딩 모드 제어를 이용한 PMD용 배터리 충전기의 채터링 저감

최준혁, 박영수
계명대학교

Chattering Reduction of PMD Battery Charger Using a Saturation Function Based Sliding Mode Control

Junhyeok Choi, Yeongsu Bak
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문에서는 포화 함수 기반 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC)를 이용한 퍼스널 모빌리티 디바이스(Personal Mobility Device, PMD)용 배터리 충전기의 채터링 저감 방법을 제안한다. PMD를 사용하기 위해서는 배터리를 충전하는 과정이 필수적이며, 오버슈트 없이 안정적으로 배터리를 충전하기 위하여 SMC 방법이 주로 사용된다. 하지만, SMC의 상태 변수를 슬라이딩 평면에 고정시키는 과정에서 스위칭 함수의 불연속성으로 인해 채터링 현상이 발생하게 된다. 채터링은 배터리 충전기의 전류 리플을 증가시키며 여러 가지 악영향을 미치게 된다. 따라서, 본 논문에서는 포화 함수를 이용한 SMC 방법을 통해 PMD용 배터리 충전기의 채터링을 저감하는 방법을 제안하며, 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화 문제가 가속화되고 있으며, 이로 인해 온실가스 배출을 저감할 수 있는 친환경 정책이 강화되고 있다. 그 중에서 전기를 동력으로 사용하여 환경 오염 물질을 배출하지 않고, 유지보수 비용과 운영 비용이 낮은 퍼스널 모빌리티 디바이스(Personal Mobility Device, PMD) 관련 시장 규모가 증가하고 있다. 하지만, PMD를 사용하기 위해서는 배터리를 충전하는 과정이 필수적이며, 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

오버슈트 없이 안정적으로 배터리를 충전하기 위한 배터리 충전기의 제어 방법으로 상태 변수를 슬라이딩 평면에서 움직이게 하는 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC)가 주로 사용된다^[2]. 하지만, SMC의 상태 변수를 슬라이딩 평면에 고정시키는 과정에서 스위칭 함수의 불연속성으로 인해 채터링 현상이 발생하게 된다. 채터링은 배터리 충전기의 전류 리플을 증가시키며, 이는 수명, 성능 등 여러 가지 악영향을 미치게 된다^[3].

따라서, 본 논문에서는 PMD를 위한 배터리 충전기의 채터링 저감을 위한 포화 함수를 이용한 SMC 방법을 제안한다. 제안하는 SMC 방법은 연속적인 포화 함수를 스위칭 함수로 이용함으로써 일반적으로 사용되는 불연속적인 스텝 함수와 비교하여 채터링을 저감시킬 수 있다. 따라서, 배터리 충전기의 리플을 감소시켜 수명과 성능을 향상시킬 수 있다. 제안하는 포

화 함수를 사용한 SMC 방법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 슬라이딩 모드 제어

2.1 일반적인 슬라이딩 모드 제어

그림 1은 PMD용 배터리 충전기에 일반적으로 사용되는 SMC 방법의 블록도를 나타낸다. SMC의 주요 목표는 SMC의 입력인 제어 변수를 0에 수렴하도록 제어하는 것이다. 이를 위하여 제어 변수를 슬라이딩 평면의 경사에 도달하게 하는 과정과 제어 변수를 슬라이딩 평면에 유지시키며 원점으로 제어하는 과정이 있다.

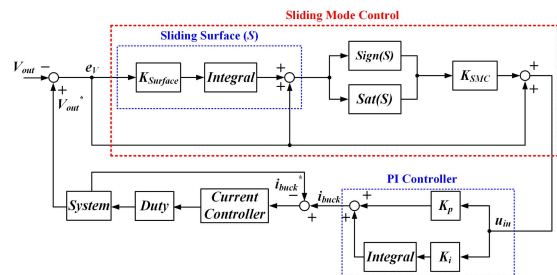


그림 1 슬라이딩 모드 제어 블록도
Fig. 1 Block diagram of sliding mode control

먼저, 제어 변수(e_v)는 배터리 충전기의 지령 출력 전압(V_{out}^*) 및 배터리 충전기의 출력 전압(V_{out})의 오차를 통해 식 (1)과 같이 계산된다.

$$e_v = V_{out}^* - V_{out} \tag{1}$$

e_v 는 슬라이딩 평면으로 도달하게 되며, 슬라이딩 평면(S)은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$S = e_v + k_s \int e_v dt \tag{2}$$

여기서, k_s 는 슬라이딩 계수로써 본 논문에서는 1로 정의한다. 또한, k_s 의 크기를 조절함으로써 제어 변수가 슬라이딩 평면의 경사에 도달하는 시간을 조절할 수 있다.

e_v 가 S에 도달한 이후, 원점으로 이동하는 과정동안 항상 S의 경사에 유지시키기 위하여 S의 부호 함수를 식 (3)과 같이

정의한다.

$$\text{Sign}(S) = \begin{cases} 1, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ -1, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

SMC에서 사용되는 PI 제어기의 입력(u_m)은 e_V 와 $\text{Sign}(S)$ 를 사용하여 식 (4)와 같이 계산한다.

$$u_{in} = e_V + K_{SMC} \text{Sign}(S) \quad (4)$$

여기서, K_{SMC} 는 SMC의 이득으로, K_{SMC} 의 크기에 따라 출력 전압 및 전류의 응답성과 채터링 현상에 영향을 미치기 때문에 적절하게 값을 설정해야 한다.

2.2 포화 함수를 이용한 슬라이딩 모드 제어

일반적인 SMC 방법의 경우 불연속적인 부호 함수로 인해 채터링이 발생하게 된다. 본 논문에서는 불연속적인 부호 함수를 연속적인 포화 함수로 대체하여 채터링을 저감하는 방법을 제안한다. 제안하는 포화 함수는 식 (5)와 같이 계산한다.

$$\text{Sat}(S) = \begin{cases} 1, & S > \Phi \\ S/\Phi, & |S| \leq \Phi \\ -1, & S < -\Phi \end{cases} \quad (5)$$

포화 함수는 SMC에서 사용되는 PI 제어기의 입력에 $\text{Sign}(S)$ 를 대신하여 사용되며, $\text{Sign}(S)$ 와 비교하여 연속적인 특성으로 인해 채터링을 저감할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 PMD를 위한 배터리 충전기의 채터링 저감을 위한 포화 함수를 이용한 SMC 방법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

그림 2의 (a)와 (b)는 각각 불연속적인 부호 함수와 연속적인 포화 함수를 사용한 경우에 출력 전압 및 전류 제어의 시뮬레이션 결과를 나타내며, 배터리 충전기의 지령 출력 전압은 31 V에서 37 V로 가변하였다. 그림 2의 (a)에서 출력 전압의 정상상태 도달 시간은 약 6.9 ms가 소요되며, 출력 전류의 리플은 약 6.28 A의 크기를 갖는다. 그림 2의 (b)에서 출력 전압의 정상상태 도달 시간은 약 7.2 ms가 소요되며, 출력 전류의 리플은 약 5.54 A의 크기를 갖는다.

포화 함수를 사용한 경우, 부호 함수를 사용한 경우와 비교하여 출력 전압의 정상상태 도달 시간이 비슷하며, 연속적인 특성으로 인해 채터링이 감소하여 출력 전류의 리플이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

일반적인 SMC 방법의 경우에 제어 변수를 슬라이딩 평면의 기울기에 유지시키기 위하여 부호 함수를 사용한다. 하지만, 부호 함수의 불연속성으로 인해 채터링 현상이 발생하게 되고 출력 전류의 리플을 증가시키게 된다. 따라서, 본 논문에서는 PMD를 위한 배터리 충전기의 채터링 저감을 위한 포화 함수

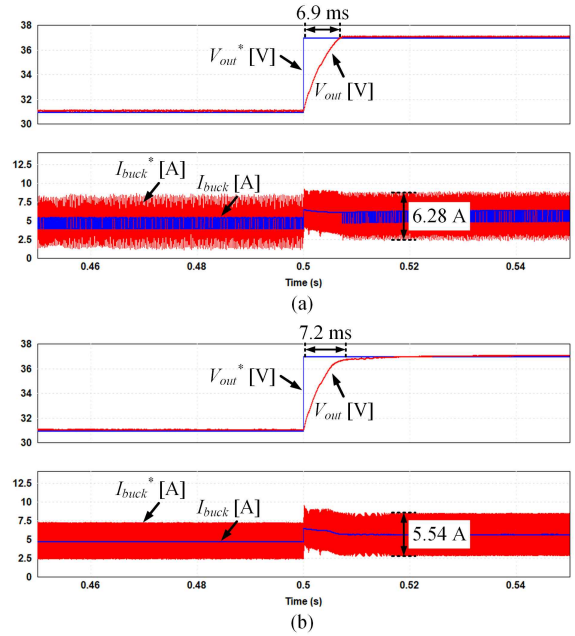


그림 2 출력 전압 제어 및 전류 제어의 시뮬레이션 결과
(a) 부호 함수, (b) 포화 함수

Fig. 2 Simulation results of output voltage control and current control
(a) Signum function, (b) Saturation function

를 이용한 SMC 방법을 제안한다. 제안하는 포화 함수를 이용한 SMC 방법은 일반적인 SMC 방법에 비해 채터링이 감소하여 전류 리플이 감소하여 배터리 충전기의 성능과 수명을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 PISM 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00165694).

참고 문헌

- [1] D.-H. Kim, M.-J. Kim, and B.-K. Lee, "An Integrated Battery Charger With High Power Density and Efficiency for Electric Vehicles," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 32, No. 6, pp. 4553-4565, Jun. 2017.
- [2] X. Yu, Y. Feng, and Z. Man, "Terminal Sliding Mode Control - An Overview," IEEE Open Journal of the Ind. Electron. Society, Vol. 2, pp. 36-52, 2021.
- [3] L. Wu, J. Liu, S. Vazquez, and S. K. Mazumder, "Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review," IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol. 9, No. 3, pp. 392-406, Mar. 2022.