

PMD용 배터리 충전기를 위한 FLC 기반 슬라이딩 모드 제어

김규리, 박영수
계명대학교

FLC Based Sliding Mode Control for Battery Charger of PMD

Gyuri Kim, Yeongsu Bak
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문에서는 퍼스널 모빌리티 디바이스(Personal Mobility Device, PMD)용 배터리 충전기를 위한 퍼지 논리 제어(Fuzzy Logic Control, FLC) 기반 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC) 방법을 제안한다. PMD에 사용되는 배터리의 다양한 전압 요구를 충족시키기 위해 빠른 동적 특성을 가진 SMC 방법을 사용한다. 그러나 SMC 방법의 채터링 현상으로 인해 출력 전류에 리플이 발생하여 배터리 충전기의 성능이 저하된다. 따라서, 본 논문에서는 PMD용 배터리 충전기를 위한 FLC 기반 SMC 방법 제안하며, 빠른 동적 특성과 전류 리플 감소를 통해 배터리 충전기의 성능을 향상시킬 수 있다.

1. 서론

최근, 환경 오염 및 화석연료 자원의 고갈 문제에 대응하여 전기 동력을 사용하는 퍼스널 모빌리티 디바이스(Personal Mobility Device, PMD) 산업이 전 세계적으로 활성화되고 있다^[1]. PMD에 사용되는 배터리는 다양한 전압 요구를 충족시켜야 하므로, 효율적으로 출력 전압을 제어하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어가 널리 사용되지만, 응답성이 느리고 동적 특성을 향상시키기 위해 복잡한 이득 조정 과정이 필요하다는 단점이 있다^[2]. 이를 해결하기 위해 빠른 응답 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC) 방법을 사용한 제어 방법이 연구되었으나, 불연속 함수로 인한 채터링 현상으로 전류에 리플이 발생하고, 리플을 줄이기 위해서는 이득 조정 과정이 필요하다는 단점이 있다^[3].

따라서, 본 논문에서는 PMD용 배터리 충전기를 위한 퍼지 논리 제어(Fuzzy Logic Control, FLC) 기반 SMC 방법 제안을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 제어 방법은 소속 함수를 설정하고, 소속 함수에 따른 출력 강도를 설정하여 이득 조정 과정을 거친다. 또한, SMC 방법의 빠른 동적 특성을 유지하면서 채터링으로 인한 인덕터 전류 리플을 효과적으로 줄일 수 있다. 소속 함수를 활용한 이득 조정 과정은 빠른 동적 응답과 리플 감소라는 장점을 가지고 있으며, 배터리 충전기의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 PI 제어기, SMC 방법과 FLC 기반 SMC 방법에 대해 설명하고, 제안하는 제어 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

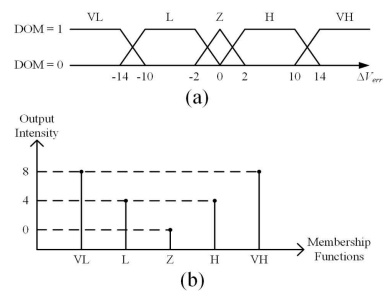


그림 1 소속 함수와 출력 강도
Fig. 1 Membership function and output intensity

2. 제어 방법

2.1 PI 제어기

PI 제어를 통해 출력 전압을 제어하기 위해서는 출력 전압과 지령 전압의 오차를 PI 제어기의 입력으로 사용하며, 전압의 오차는 비례 제어기와 적분 제어기를 통해 출력 전압을 제어한다. 비례 이득을 크게 할수록 응답성이 빨라지고, 적분 이득을 크게 할수록 오차가 감소하는 속도가 증가한다. 하지만 이득의 크기에 따라 오버슈트가 발생할 수 있으며, 시스템이 불안정할 수 있다. 제어기의 이득의 크기에 따라 시스템의 성능이 결정되므로, 이득 조정 과정이 필요하다.

2.2 SMC 방법

SMC 방법을 통해 출력 전압을 제어하기 위해서는 출력 전압과 지령 전압의 오차를 제어기의 입력으로 사용하며, 전압 오차를 통해 슬라이딩 평면을 식 (1)과 같이 계산한다.

$$S = V_{err} + \int V_{err} dt \quad (1)$$

여기서, V_{err} 는 출력 전압과 지령 전압의 오차를 나타낸다. 슬라이딩 평면의 값에 따라 식 (2)와 같이 부호 함수를 정의하고, 부호 함수를 통해 제어기의 출력을 식 (3)과 같이 계산한다. 식 (3)를 통해 계산된 출력은 PI 제어기의 입력이 되며 PI 제어기를 통해 결과적으로 출력 전압을 제어한다. 이때, 부호 함수는 -1, 0, 1의 값을 가지며, 계단 함수의 형태를 가진다. 이러한 부호 함수의 불연속성으로 인해 채터링 현상이 발생하며, 채터링 현상으로 인해 전류 리플이 발생한다.

$$\text{sgn}(S) = \begin{cases} 1, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ -1, S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$e_{in} = V_{err} + K_{smc} \text{sgn}(S) \quad (3)$$

여기서, K_{smc} 는 이득을 나타낸다. K_{smc} 를 크게 할수록 채터링 현상으로 인해 출력 전류의 리플이 커지며, 작게 할수록 응답성이 느려진다. K_{smc} 의 크기에 따라 제어기의 성능이 결정되므로, 이득 조정 과정이 필요하다. 이러한 단점을 극복하기 위해 퍼지 로직 제어를 사용하여 과도 상태에서는 이득의 크기를 증가시켜 응답성을 높이며, 정상 상태에서는 이득의 크기를 감소시켜 전류 리플을 저감한다.

2.3 FLC 기반 SMC 방법

그림 1의 (a)와 (b)는 각각 소속 함수와 소속 함수에 따른 출력 강도를 나타낸다. 소속 함수는 정상 상태에서 전류 리플을 줄이기 위해 1개의 삼각형과 응답성 향상을 위한 4개의 사다리꼴로 설정한다. 또한, 출력 강도는 8, 4, 0으로 설정하여 과도 상태에서는 이득의 크기를 증가시키고, 정상 상태에서는 이득의 크기를 감소시켜 제어 응답성과 전류 리플을 개선한다.

FLC 제어 방법에서는 출력 전압과 지령 전압의 오차인 V_{err} 가 입력 변수가 되며, SMC 방법에서 사용되는 이득을 출력 변수로 갖는다. V_{err} 에 따라 범위를 나누어 값을 결정하고, 출력 강도를 통해 식 (4)와 같이 이득 값을 결정한다. 예를 들어, 오차가 10인 경우 각 소속 함수 H, VH에 할당되며, 각각 1과 0이다. VL, L, Z는 각각 0이므로, K_{smc} 는 8이 된다.

$$K_{smc} = \text{DOM}(VL) \cdot 8 + \text{DOM}(L) \cdot 4 + \text{DOM}(Z) \cdot 0 + \text{DOM}(H) \cdot 4 + \text{DOM}(VH) \cdot 8 \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과

PSIM 시뮬레이션을 통해 FLC 기반 SMC 방법을 적용한 개선된 PMD용 배터리 충전기의 타당성을 검증하였으며, 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

V_{grid}	220 V _{rms} /60 Hz	R_{out}	5 Ω
PI- K_{p_vc}	0.18	PI- K_{i_vc}	157.91
PI- K_{p_cc}	1.15	PI- K_{i_cc}	2554.25
SMC- K_{smc}	4	f_{swich}	80 kHz

그림 2의 (a), (b), (c)는 각각 PI 제어기, SMC 방법, 제안하는 FLC 기반 SMC 방법에 따른 출력 전압 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 배터리 충전기의 출력 전압은 24 V에서 36 V로 가변하였으며, 출력 전압은 지령 전압에 따라 적절히 제어된다. 또한, 그림 3의 (c)는 (a)에 비해 제어 응답성이 약 2.3배 정도 빨라진 것을 확인할 수 있으며, (b)에 비해 전류 리플이 약 1 A 정도 감소한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 제안한 FLC 기반 SMC 방법은 PI 제어기에 비해 응답성이 향상되었으며, SMC 방법에 비해 전류 리플 저감이 가능하여 PMD 배터리 충전기의 성능을 향상시킬 수 있다.

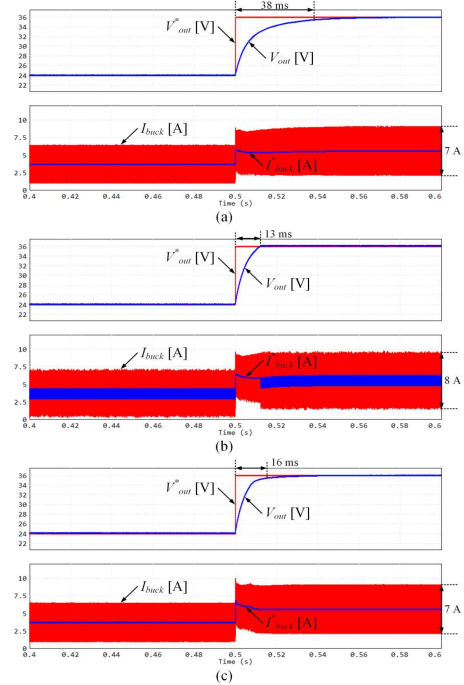


그림 2 출력 전압 제어 시뮬레이션 결과 (a) PI 제어, (b) SMC 방법, (c) FLC 기반 SMC 방법

Fig. 2 Output voltage control simulation results (a) PI control, (b) SMC method, (c) SMC method based on FLC

4. 결론

본 논문에서는 PMD용 배터리 충전기를 위한 FLC 기반 슬라이딩 모드 제어 방법 제안한다. 제안된 제어 방법은 소속 함수와 출력 강도를 통해 제어기의 이득을 결정하며, 이를 통해 과도 상태에서의 응답성, 정상 상태에서의 전류 리플을 저감할 수 있다. 결과적으로 PMD 배터리 충전기의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 PI제어기, SMC 방법과 FLC 기반 SMC 방법에 대해 설명하고, 제안하는 제어 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

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

참고 문헌

- [1] S.-K. Lim, H.-S. Lee, H.-R. Cha, and S.-J. Park, "Multi-Level DC/DC Converter for E-Mobility Charging Stations," IEEE Access, Vol. 8, pp. 48774-48783, Mar. 2020.
- [2] J. Guo, "The Load Frequency Control by Adaptive High Order Sliding Mode Control Strategy," IEEE Access, Vol. 10, pp. 25392-25399, Feb. 2022.
- [3] Q. Wang, H. Yu, M. Wang, and X. Qi, "An Improved Sliding Mode Control Using Disturbance Torque Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Access, Vol. 7, pp. 36691-36701, Mar. 2019.