척수 자극을 위한 바이페이직 펄스 발생기 설계

Design of a Biphasic Pulse Generator for Spinal Cord Stimulation

Jeyeon Kim, Dohyeong Ko, Suhwan Lee, and Jungsuk Kim
Department of Biomedical Engineering, Gachon University, South Korea

e-mail : jeyeon100@gachon.ac.kr

Abstract

We designed and implemented a biphasic pulse generation system using a Boost converter and H-bridge. The input voltage was boosted to approximately 50 V, and stable biphasic pulses with positive and negative phases were successfully generated. An MCU was used to control the pulse width, frequency, and phase delay between the cathode and anode. The designed circuit was fabricated as a PCB, and stable pulse output with a pulse width of approximately 100 μs and a period of 100 ms was confirmed through oscilloscope measurements. In addition, it was verified that the output waveform characteristics could be adjusted through parameter control. The proposed system is expected to be applicable to electrical stimulation and various biomedical applications.

I. 서론

최근 손상된 척수 및 신경 조직의 기능 회복을 위한 생체 전기 자극(biomedical electrical stimulation) 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]-[4]. 특히 retinal prosthesis 및 spinal cord stimulation 분야에서는 손상된 신경세포를 전기적으로 자극하여 기능을 보조하거나 회복시키기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다 [1], [2]. 이러한 생체 전기 자극 시스템에서는 안정적이고 안전한 전기 자극 신호 생성이 매우 중요한 요소로 요구된다.

기존의 monophasic stimulation 방식은 단일 방향 전류를 이용하여 자극을 전달하기 때문에 전하 축적(charge accumulation) 문제가 발생할 수 있으며, 이는 생체 조직 손상 및 전극 열화를 유발할 수 있다 [4], [5]. 또한 장시간 자극 환경에서는 전류 불균형으로 인해 자극 안정성이 저하될 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 양방향 전류를 사용하는 biphasic stimulation 방식이 널리 사용되고 있다.

Biphasic pulse stimulation은 cathodic phase와 anodic phase를 이용하여 전하 균형(charge balancing)을 유지할 수 있으며, 이를 통해 조직 손상 가능성과 전극 부식을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다 [5]. 또한 안정적인 전기 자극 전달이 가능하여 장기적인 생체 자극 환경에 적합한 구조로 알려져 있다. 최근에는 고밀도 전극 기반 자극 시스템에서 발생하는 전기적 간섭(crosstalk) 및 전류 누설 문제를 감소시키기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다 [6].

따라서 본 연구에서는 안정적인 biphasic pulse 생성을 위한 MCU 기반 생체 전기 자극 시스템을 구현하였다. 제안한 시스템은 boost converter를 이용하여 자극 전압을 생성하고, H-bridge 회로를 통해 양방향 biphasic pulse를 생성하도록 설계하였다. 또한 MCU를 이용하여 pulse width, frequency 및 phase delay를 제어할 수 있도록 구현하였다. 제안한 시스템은 PCB 기반으로 제작되었으며, oscilloscope 측정을 통해 biphasic pulse의 정상 동작을 검증하였다.

II. 본론

2.1 전체 시스템 구조

Fig. 1은 제안한 biphasic pulse generator의 PCB 구현 결과를 나타낸다. 본 시스템은 boost converter, H-bridge, 그리고 MCU 제어부로 구성된다. 전체 시스템은 저전압 입력을 승압한 후 양방향 전기 자극 신호를 생성하도록 설계하였다. MCU는 각 회로 블록의 동작 타이밍을 제어하며, biphasic pulse의 pulse width, frequency, 그리고 cathode-anode 간 시간 지연(interphase delay)을 조절하는 역할을 수행한다. 생성된 biphasic pulse는 생체 전기 자극을 위한 신경 자극 신호로 사용된다.

2.2 Boost Converter

Boost converter는 입력 전압인 5 V를 약 50 V 수준으로 승압하여 biphasic stimulation pulse 생성에 필요한 고전압 공급을 수행한다. 인덕터와 스위칭 소자를 이용하여 에너지를 저장 및 방출하며, 승압된 전압은 출력 커패시터에 저장된다. 생성된 고전압은 이후 H-bridge 회로의 입력 전압으로 사용된다. 안정적인 고전압 출력 생성을 위해 PCB 레이아웃 설계 시 고전류 경로를 짧고 굵게 구성하였으며, 승압 회로 블록을 최대한 밀집하여 배치하였다. 이를 통해 전압 강하 및 스위칭 노이즈를 최소화하도록 설계하였다.

2.3 H-Bridge 회로

H-bridge 회로는 boost converter에서 생성된 고전압을 이용하여 양·음 방향의 biphasic pulse를 생성한다. 스위칭 소자의 동작 순서를 제어하여 출력 극성을 반전시키며, 이를 통해 양방향 전기 자극 신호를 구현하였다. 생성된 biphasic pulse는 cathodic phase와 anodic phase를 순차적으로 출력하도록 구성하였다. 또한 전하 축적(charge accumulation)을 최소화하고 조직 손상을 감소시키기 위해 양·음 위상을 모두 사용하는 biphasic stimulation 구조를 적용하였다 [5].

2.4 MCU 제어부

MCU 제어부는 boost converter와 H-bridge의 스위칭 타이밍을 제어하는 역할을 수행한다. MCU에서 생성된 제어 신호를 이용하여 boost converter의 충전 동작과 biphasic pulse의 출력 동작을 제어하였다. 또한 MCU 프로그램을 통해 pulse width, 반복 주파수(frequency), 그리고 cathode-anode 간 시간 지연(interphase delay)을 조절할 수 있도록 구성하였다. 이를 통해 다양한 생체 전기 자극 조건에 유연하게 대응할 수 있도록 설계하였다.

III. 구현

3.1 PCB 구현

설계한 회로는 PCB 형태로 제작하였다. PCB에는 Boost converter, H-bridge, 그리고 MCU 제어부를 포함하여 전체 Biphasic pulse 생성 시스템을 구현한다. 안정적인 승압 동작을 위해 Boost converter 블록의 배선 길이를 최소화하며, 고전류 경로를 짧고 굵게 설계한다. 또한 전체 회로에는 Ground plane을 적용하여 노이즈 영향을 감소시킨다.

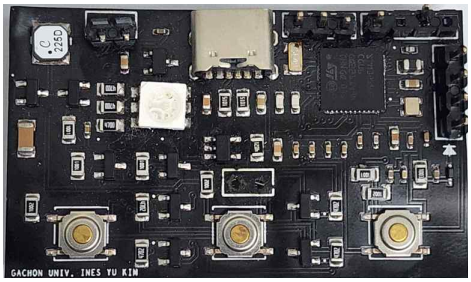


Fig. 1. Fabricated PCB of the proposed biphasic pulse generator

3.2 Biphasic Pulse 출력 결과

제작된 PCB의 출력 파형은 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 측정 결과 약 50 V 수준의 출력 전압이 생성되었으며, 양·음 위상을 가지는 biphasic pulse가 정상적으로 출력됨을 확인하였다. 또한 약 100 μs의 펄스 폭과 100 ms의 반복 주기를 가지는 안정적인 출력 특성을 확인하였다.

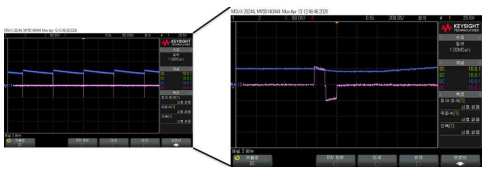


Fig. 2. Output waveform of the Boost converter and biphasic pulse generator

3.3 파라미터 조절 결과

MCU 제어 신호를 이용하여 biphasic pulse의 주요 파라미터를 조절하였다. 펄스 폭을 감소시킨 경우 각 phase의 지속 시간이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 반복 주파수를 증가시킨 경우 동일 시간 내 반복 횟수가 증가하는 것을 확인하였다. Cathode와 anode 간 시간 지연을 증가시킨 경우 두 신호 간의 간격이 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안한 시스템이 다양한 biphasic pulse 조건을 유연하게 생성할 수 있음을 검증하였다.



Fig. 3. Waveform control results for pulse width, frequency, and phase delay

Ⅳ. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 boost converter와 H-bridge를 이용하여 biphasic pulse를 생성하는 MCU 기반 척수 자극기를 설계 및 구현하였다. 입력 전압을 50 V 수준으로 승압하였으며, 안정적인 biphasic pulse 출력 특성을 확인하였다. 또한 MCU 제어를 통해 pulse width, frequency, 그리고 cathode-anode 간 phase delay를 조절할 수 있었으며, oscilloscope 측정을 통해 출력 biphasic pulse 파형 특성을 검증하였다.

Biphasic pulse는 전하 불균형과 전류 누설을 감소시켜 생체 조직 손상을 줄일 수 있다는 장점이 있으며, 다양한 신경 자극 시스템에 활용될 수 있다. 본 연구에서 구현한 자극기는 손상된 척수에 전기 자극을 인가하기 위한 기초 stimulation 플랫폼으로 활용 가능하다. 또한 제안한 시스템은 비교적 단순한 회로 구조와 높은 제어 유연성을 기반으로 다양한 자극 조건 구현이 가능함을 확인하였다.

향후 연구에서는 출력 안정성 향상과 소형화를 위한 회로 최적화를 진행할 예정이며, 보다 다양한 biphasic waveform 제어 기법을 적용할 계획이다. 또한 실제 생체 환경에서의 자극 특성 분석과 장기적인 안정성 검증을 통해 척수 자극 및 다양한 biomedical stimulation 분야에 적용 가능한 생체 전기 자극 시스템으로 확장하고자 한다.

참고문헌

[1] Chen, K.; Yang, Z.; Hoang, L.; Weiland, J.; Humayun, M.; Liu, W.
“An Integrated 256-Channel Epiretinal Prosthesis.”
IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 45, 2010, pp. 1946 - 1956.

[2] Ortmanns, M.; Rocke, A.; Gehrke, M.; Tiedtke, H.J.
“A 232-Channel Epiretinal Stimulator ASIC.”
IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 42, 2007, pp. 2946 - 2959.

[3] Chen, K.; Lo, Y.K.; Yang, Z.; Weiland, J.D.; Humayun, M.S.; Liu, W.
“A System Verification Platform for High-Density Epiretinal Prostheses.”
IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 7, 2012, pp. 326 - 337.

[4] Liu, W.; Vichienchom, K.; Clements, M.; DeMarco, S.; Hughes, C.; McGucken, E.; Humayun, M.; De Juan, E.; Weiland, J.; Greenberg, R.
“A Neuro-Stimulus Chip with Telemetry Unit for Retinal Prosthetic Device.”
IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 35, 2000, pp. 1487 - 1497.

[5] Oh, S.; Ahn, J.-H.; Lee, S.; Ko, H.; Seo, J.M.; Goo, Y.-S.; Cho, D.-I.
“Light-Controlled Biphasic Current Stimulator IC Using CMOS Image Sensors for High-Resolution Retinal Prosthesis and In Vitro Experimental Results with rd1 Mouse.”
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 62, 2014, pp. 70 - 79.

[6] Matteucci, P.B.; Barriga-Rivera, A.; Eiber, C.D.; Lovell, N.H.; Morley, J.W.; Suaning, G.J.
“The Effect of Electric Crosstalk in Retinal Neurostimulation.”
Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol. 57, 2016, pp. 1031 - 1037.