

논문 2025-4-11 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2025.12.11>

대출력 오디오 증폭기에 대한 스위칭 모드 전원회로의 적용에 관한 연구

이현창*†

A study on the Application of Switching-mode power supply
to High-power Audio Amplifiers

Hyun-Chang Lee*†

요약

본 논문에서는 저가격, 소형화의 특성으로 인해 현재 대부분의 전자기기에 사용되는 SMPS를 대출력 오디오 시스템에 적용할 때 발생되는 문제점을 분석하였다. 분석 결과 오디오 출력의 특성이 SMPS의 전압 유지 특성과 다르며, 이는 특히 베이스 충격음에서 심하게 나타남을 확인하였다. 따라서 대용량 커패시터를 이용하는 것은 불가피하고, 이 때의 러시 전류 문제를 해결하기 위해 2차 PWM 회로를 적용해 정전류 제어하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법의 타당성을 확인하기 위해 회로를 구성해 실험을 진행한 결과, 기존의 20A를 초과하는 러시 전류에 의해 SMPS가 구동불능 상태로 돌입하던 상태가 SMPS 정격을 넘지 않는 2A의 일정 전류로 충전이 완료되는 개선효과를 확인하였다.

Abstract

In this paper, we analyzed the problems that arise when applying SMPS, which is currently used in most electronic devices due to its low price and miniaturization characteristics, to high-power audio systems. The analysis results confirmed that the characteristics of the audio output are different from the voltage maintenance characteristics of the SMPS, and this is particularly evident in bass impact sounds. Therefore, it is inevitable to use a large-capacity capacitor, and to solve the rush current problem at this time, a method of constant current control by applying a secondary PWM circuit was proposed. To verify the validity of the proposed method, an experimental circuit was constructed and an experiment was conducted. As a result, it was confirmed that a large-capacity capacitor was charged quickly without exceeding the rating of the SMPS.

한글키워드 : 스위칭 전원, 대출력 오디오, 전원회로, 스위칭 모드, 오디오 시스템

keywords : SMPS, high-power audio, power supply, switching mode, audio system

1. 서론

* 공주대학교 정보통신공학과

† 교신저자: 이현창(email: hclee@kongju.ac.kr)

접수일자: 2025.11.27. 심사완료: 2025.12.09.

제재확정: 2025.12.20.

최근의 반도체 소자의 발전으로 인해 다양한 분야에서 소형화 및 고성능화 성향이 두드러지고

있으며, 이는 IT기기, 컴퓨터 분야뿐만 아니라 전자기기에 전원을 공급하는 전원장치에도 큰 영향을 미쳐 최근의 대부분 전자기기들은 스위칭-모드 전원장치(SMPS; Switching-Mode Power Supply)를 사용해 그 가격은 물론 부피와 무게를 크게 줄이고 있다[1],[2].

SMPS는 동일한 전력을 공급하기 위한 회로의 부피와 무게가 트랜스포머에 의한 고전적인 전원회로에 비해 수십 분의 일 수준으로까지 줄어들어, 스마트-폰의 충전장치, 컴퓨터 모니터 전원장치, 자동차 전압 변환회로 등을 비롯해 컴퓨터 전원회로, 텔레비전 전원회로 등 각종 가전제품의 전원회로로 사용되고 있으며[3],[4],[5], 이러한 추세는 더욱 가속화될 전망이다. 그러나 이러한 추세에도 불구하고 여전히 SMPS를 적용하는데 소극적인 분야 중 하나가 대형 오디오 시스템이다. SMPS를 오디오 시스템에 적용하는 경우 가장 먼저 SMPS로부터 발생하는 특유의 고주파 잡음 문제로 인해 음질이 크게 저하한다는 문제점과 더불어, 음악 전문가들의 경우 SMPS를 적용 시 “음질의 박력이 떨어진다”는 평가를 내리고, 이러한 이유들 때문에 SMPS의 다양한 장점에도 불구하고 오디오 시스템에서는 여전히 대형 트랜스포머를 이용한 전원회로를 사용한다[6].

본 논문에서는 오디오 시스템에 SMPS를 적용 시 발생하는 문제점을 극복하기 위한 방법을 모색하고, 특히 “음질의 박력이 떨어진다”라는 감성적인 평가가 구체적으로 어떤 원인에 의한 것인지를 규명하고 이러한 문제점을 해소할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. SMPS의 원리 및 특징

2.1 고전적 전원회로

SMPS의 원리를 이해하기 위해 고전적인 전원

회로의 원리를 살펴본다. 그림 1에 전자공학 교과서에 소개되는 전형적인 전원회로의 구성을 나타내었다.

그림에서 T101로 표기된 부분은 교류 전압을 변환하는 트랜스포머(transformer)이며, 상용 교류를 용도에 맞는 전압으로 변환한다[7],[8].

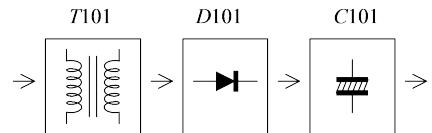


그림 1. 고전적인 전원회로의 구성

Fig. 1. Configuration of classical power

이후 다이오드 정류회로에서 정류하고 커패시터에서 평활해 출력한다.

이러한 구성의 전원회로는 부품이 적고 구성이 간단해 과거의 어댑터를 비롯해 대부분의 가전제품 등에 사용되었으나 트랜스포머의 부피 및 중량이 크고 가격이 비싸 현재는 이를 개선한 SMPS를 주로 사용한다. 그림 2에 그림 1의 최종 출력파형을 나타내었다.

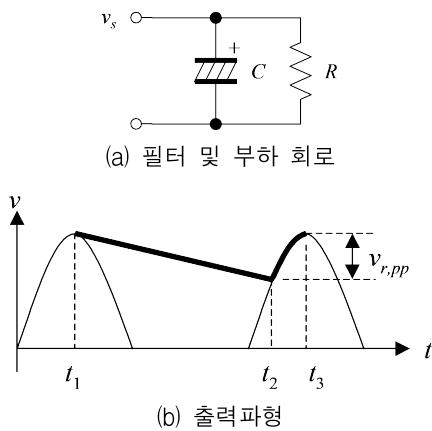


그림 2. 전원회로의 출력파형
Fig. 2. Output waveform of the power circuit

그림 2(a)는 필터회로의 C 와 이 전원을 사용하는 대상을 부하저항 R 을 나타낸 것이며, 이의 출

력은 그림 2(b)와 같다. 그림 2(b)로부터 식 (1)과 같은 근사식을 얻을 수 있다[7].

$$V_{r, pp} \cong \frac{V_p}{R \cdot C \cdot f} \quad (1)$$

2.2 SMPS의 원리 및 특징

식 (4)로부터 부하 저항 R 이 클수록, 필터 커페시터 C 가 클수록, 그리고 주파수 f 가 클수록 리플 전압은 줄어든다. 고전적인 전원회로에서 주파수 f 는 고정되므로 부하 저항 R 과 C 에 의해 서만 리플 전압을 설정할 수 있다. 이 때 주파수 f 를 극단적으로 높일 수 있다면, C 가 작아도 동일한 리플 전압 범위를 얻을 수 있으며, 이 원리를 이용한 것이 그림 3의 스위칭 모드 전원 장치 SMPS(Switching-mode Power supply)이다[2].

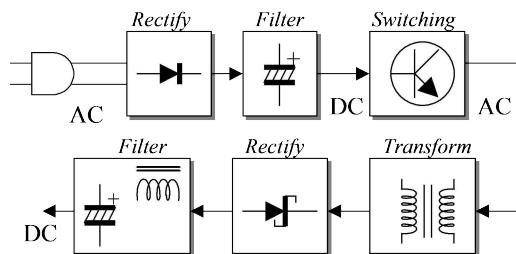


그림 3. SMPS의 구성

Fig. 3. Configuration of SMPS

주파수를 크게 높인 후 트랜스포머를 통과시키면 트랜스포머의 전력 전달 비가 크게 향상되므로 동일한 전력을 전달할 때 크기가 매우 작아진다. 이처럼 SMPS는 주파수를 크게 높임으로써 필터 커페시터와 트랜스포머의 부피와 질량이 크게 작아지고, 특히 주파수가 높기 때문에 인덕터를 이용한 필터의 경우 매우 효과적이다[2].

이상에서 살펴본 바와 같은 원리에 의해 동일한 전력을 공급할 경우 SMPS의 부피와 중량이 크게 작아져 소형화가 가능하다.

3. 오디오시스템 적용 시 문제점 분석

SMPS를 오디오 시스템에 적용 시 발생하는 문제점 및 원인을 살펴본다.

3.1 스위칭 잡음의 해결 방안

SMPS는 매우 높은 주파수를 사용하므로 그 주파수가 설명 인간의 가청주파수를 훨씬 뛰어넘는다 할지라도 그 고조파가 오디오 신호에 영향을 미칠 수 있다. 특히 이러한 잡음은 전자파 형태로 방사되는 것도 있지만, 직류 공급 라인으로 함께 유입되는 특징이 있다. 그러나 이는 증폭기의 전원 인입구에 필터회로를 설치함으로써 비교적 쉽게 제거할 수 있다.

3.2 음악의 "박력 감소" 원인의 분석

음악 전문가들이 말하는 음악의 박력이란 특히 저음 영역의 충격음을 의미하는데, 이 중 베이스 드럼소리가 대표적이라 할 수 있다. 이는 매우 낮은 주파수 음이 상당시간 유지되는 (envelope) 특징이 있으며, 이에 따라 오디오 시스템 전원의 대부분을 이 영역에서 사용한다. 3D 스피커 시스템을 구성할 때 각 음역별 에너지 양은 고음 영역에 비해 저음 영역은 일반적으로 10배에서 20배의 전력을 할당한다. 따라서 전원회로의 공급전력은 대부분 저역 부분에 집중된다 할 수 있다[6].

고전적인 오디오 전원회로의 경우 그림 1의 필터 커페시터를 매우 큰 용량을 사용해 리플을 줄이면서 동시에 순간적인 전력사용을 완충한다. 즉 베이스 드럼의 충격음이 발생할 때 사용될 매우 큰 에너지를 대용량의 커페시터에서 공급하므로 충격음에 대해 전압 변동이 거의 발생하지 않도록 설계한다. 이에 비해 SMPS는 앞서 고찰한 바와 같이 주파수를 높이는 대신 출력 커페시터를 극소화했기 때문에 충격음과 같은 큰 에너지 소모에

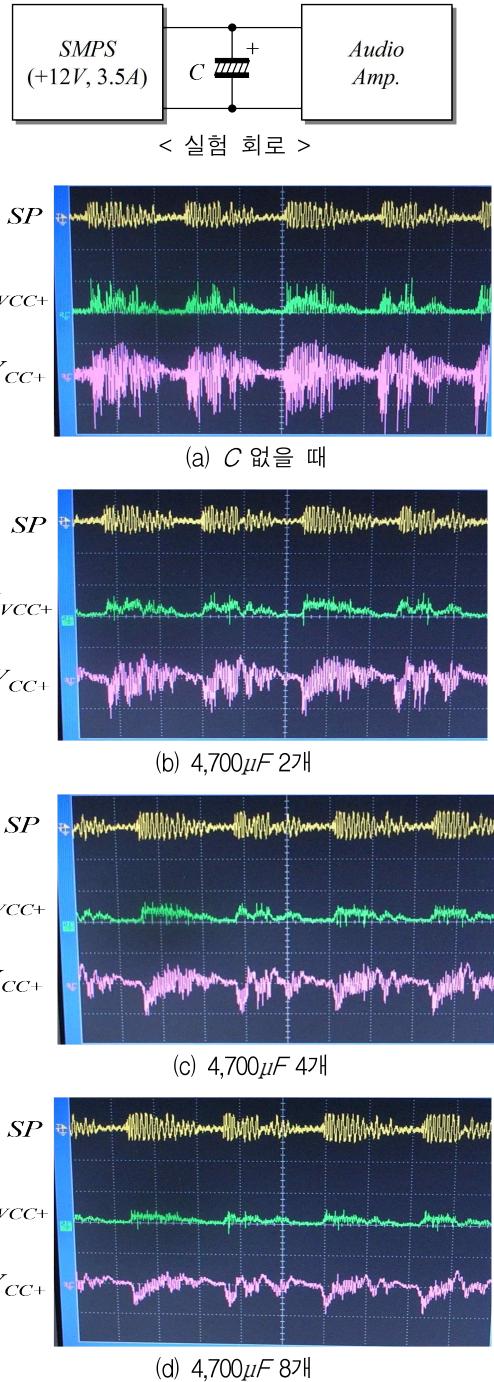
대해 전압이 안정적이지 못하며, 따라서 충격음이 발생할 때 전압이 감소해 충격음이 충실히 재생이 되지 못하는 문제점이 발생한다. 그럼 4에 SMPS와 오디오 증폭기 사이에 커패시터를 접속한 상태에서 충격음을 출력하는 실험을 진행했을 때의 전압변동을 나타내었다. 여기서, 오디오 증폭기는 $\pm 12V$ 로 동작하는 LM3886 2개를 BTL(Balanced Trans-Less) 접속한 것으로서[9], $-12V$ 는 다른 전원회로를 이용해 접속하고, 스피커 한 단의 출력과 $+12V$ 의 상태를 측정한 것이다.

그림 4(a)는 SMPS와 오디오 증폭기 사이에 추가적인 커패시터 없이 직접 접속한 상태로서 매우 큰 전압변동이 발생하며, 커패시터를 단계적으로 추가하면 그 변동 폭이 크게 감소함을 알 수 있다. 단, 그림 2의 채널 3은 과정을 더 명확히 확인하기 위해 오실로스코프의 커플링을 AC로 설정한 것으로서, 전체적인 큰 흔곡은 평균의 흔들림이고 미세 부분의 크기가 실제 변동폭이다. 또한 채널 2의 전류는 0.2Ω 의 저항을 통과한 값으로서, $200mV@1A$ 의 전류를 나타낸다.

충격음 발생 시 순간전류는 약 $2A_p$, 전압은 약 $10V_p$ 로서, BTL 접속이므로 전압은 2배가 되어 $40W$ 의 순간전력이 발생한다. 이 때의 전압변동은 커패시터 4개($18,800\mu F$)일 때 약 $1.8V_{PP}$ 의 변동이 발생하며, 전류 검출분 $0.4V$ 를 제외했을 때의 순간 리플률은 식 (2)와 같다.

$$VR_{r, imp} = \frac{1.4 V_{pp}}{12 V} \times 100 \\ = 11.67\% \quad (2)$$

전압이 이와 같이 순간적으로 변화하면 충격음에 상당한 영향을 미쳐 음악 전문가에게는 음악의 박력이 감소하는 것으로 느껴진다. 따라서 기존의 SMPS를 대용량 오디오 시스템에 적용하려면 대용량의 커패시터를 설치하는 것은 불가피한 선택이라 할 수 있다.



CH1: DC $20V/div$, CH2: DC $500mV/div$

CH3: AC $2V/div$, Time: $200 mS/div$

그림 4. 충격음 발생 실험 결과

Fig. 4. Results of impact sound output experiment

커패시터 소자 방정식으로부터[7]

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} i \cdot t \quad (4)$$

여기서 시간 t 는 충격음의 지속시간, SMPS가 전압 하강 시 전압을 복원하는 반응시간, SMPS의 출력 임피던스, 커패시터의 순 임피던스 등 매우 복잡하고 다양한 요인에 의해 변화해 정확한 계산이 불가하므로 이러한 모든 요인을 반영한 상수 K 로 놓으면 식 (5)와 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} v_r &= \frac{1}{C} i \cdot K \\ \therefore C &= \frac{i}{V_r} K \end{aligned} \quad (5)$$

그림 4에서 사용된 SMPS의 실험 결과 데이터를 대입하면, 식 (6)과 같은 상수를 얻는다.

$$K = \frac{1.4 V_{pp}}{2A} \cdot 18,800 \mu F = 13.16 mS \quad (6)$$

전원전압 +12V의 5% 순간 변화율을 얻으려면 식 (7)과 같은 용량의 커패시터가 필요하다.

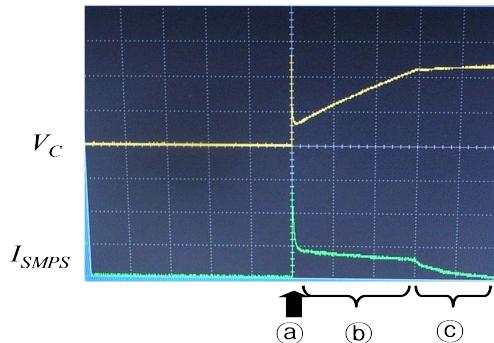
$$\begin{aligned} C &= \frac{2A}{0.24V} \cdot 13.16 mS \\ &= 109.667 \mu F \end{aligned} \quad (7)$$

이는 실험에 근거한 근사값이므로 정확하지 않지만, 대출력 오디오 시스템에서 일반적으로 사용하는 값과 유사하다[6].

한편, SMPS에 대용량의 커패시터를 부착한 경우 오디오 초기 기동 시 커패시터에 과전류

(rush current)가 일정 시간 흐른다. 이러한 과정에서 고전적인 트랜스포머는 출력 전압만 저하할 뿐 시간이 지나면 충전이 진행되면서 본래의 전압으로 회복되지만, SMPS의 경우 과전류가 일정시간 지속되면 시스템 오류로 간주해 내부 보호회로에 의해 출력을 차단한 상태에서 홀딩(holding)되어 충전이 이루어지지 않는 것이 대부분이다. 그럼 5는 SMPS 어댑터에 대용량 커패시터를 부착한 후 전원을 on했을 때 커패시터의 전압 및 SMPS 전류 상태를 나타내었다.

실험에 사용한 SMPS는 $37,600 \mu F (4700 \mu F \times 8)$ 의 커패시터에 접속하였으며, 이때 여러 종류의 SMPS로 전원을 공급한 결과 모두 즉시 홀딩 상태로 진입해 관측이 불가하였다. 따라서 $3.5A$ 금SMPS를 과전류 제한회로를 동작하지 않도록 조치한 후 출력의 변화를 확인하였다. 단, 전류는 0.2Ω 의 저항을 통해 관찰하였다.



CH1: DC5V/div, CH2: DC2V/div, Time: 20mS/div
그림 5. 대용량 커패시터가 접속된 SMPS 기동특성
Fig. 5. Starting characteristics of SMPS with large capacity capacitors connected

관측 결과 초기 전원투입 순간(@점)에는 $20A$ 가 넘는 전류가 순간적으로 흐르고, 이후 충전이 이루어지면서(⑤구간) 약 $10A$ 로부터 점차 줄어들며, $60mS$ 이후(⑥구간)에서 비로소 SMPS의 정격으로 진입한다.

3.3 러시 전류 문제점의 해결 방안-1

초기 rush 전류 제한을 위해 저항이나 써미스터(Thermistor) 등을 사용할 수 있다. 이 방법은 컴퓨터용 스위칭 파워 등의 1차측에 적용되어 있는 것으로서, 특히 고정 저항보다 써미스터를 활용하는데, 초기에는 써미스터의 내부 저항이 비교적 커 전류를 제한하지만, 동작이 진행될수록 써미스터의 발열 등으로 인해 저항이 점차 작아지는 특성을 이용한다. 그러나 이는 스위칭 전원에서 전류가 작은 1차측에 사용되는데 비해, 대용량 오디오의 경우 큰 전류로 동작하므로, 정상적인 오디오 동작 시에도 상당한 전력소비가 발생하는 문제점이 존재한다. 따라서 이를 보완하기 위해 충전이 완료됨을 검출해 릴레이 소자를 이용해 직결시키는 방법을 고려할 수 있지만, 전압검출 회로와 릴레이 소자 등에 의해 복잡성이 크게 증가하고 가격 또한 크게 상승한다.

3.4 러시 전류 문제점의 해결 방안-2

러시 전류를 제한할 수 있는 두 번째 방안으로는 SMPS의 초기 기동 시 전압 상승속도를 조절하는 slow-start 시간 설정을 조절하는 것이다. 그러나 이는 SMPS마다 회로가 다르기 때문에 사용하려는 SMPS마다 회로를 분석해 소자를 변경해야 하므로 매우 복잡하고 현실성이 없다. 또한 slow-start 기능이 내부적으로 고정된 소자를 사용하는 SMPS의 경우에는 변경이 불가능하다.

3.5 러시 전류 문제점의 해결 방안-3

세 번째 방안으로는 SMPS 종류 및 커패시터 용량에 무관하도록 그림 6과 같은 제 2의 PWM 스위치를 소프트웨어를 통해 커패시터에 정전류로 충전하는 것이다.

최근의 MOSFET 소자와 마이크로컨트롤러는 매우 저렴하면서도 고성능화 되었으므로 구현하기 용이하고 타당성 있는 방법으로 여겨진다.

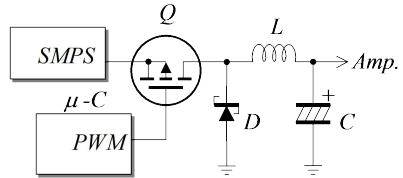


그림 6. 정전류 제어를 위한 회로

Fig. 6. Circuit for constant current control

이는 정전류 제어를 통해 충전을 진행하므로 SMPS의 보호는 물론 커패시터의 수명 연장에도 큰 도움이 될 수 있다. 또한 충전이 완료된 후 정상 운전 상태에서는 필터용 인덕터에 의해 SMPS의 기타 잡음을 제거하는 효과도 기대할 수 있다.

4. 실험 및 검토

그림 7은 과전류 방지를 위한 정전류 알고리즘을 나타낸 것으로서, 커패시터로 유입되는 전류를 A/D 변환해 이 값이 한계 전류보다 작다면 PWM 비율을 증가시키고, PWM의 최대값에 도달하면 PWM을 완전한 on상태로 유지한다.

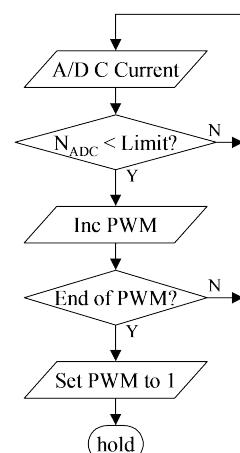


그림 7. 정전류 제어 플로차트

Fig. 7. Flowchart for constant current control

이상에서 고찰한 사항들을 확인하기 위해 그림 6의 회로에 그림 7의 정전류 알고리즘을 적용한 실험 결과를 그림 8에 나타내었다. 실험에 사용한 프로세서는 ATMEL의 ATtiny13A이며[10], 인덕터는 $200\mu H$, PWM 주파수는 $37.5kHz$ 를 사용하고[11], 전류 제한은 $2A$ 로 설정하였다.

그림 8에서, ④점은 전원 투입 시점이며, 프로세서가 안정화된 후 구간 ⑤ 사이에서 PWM의 비율이 점차 증가하며, 이 구간동안 전류 I_{SMPS} 는 $2A$ 를 유지하면서 커패시터 전압 V_C 가 직선적으로 상승함을 알 수 있다. ⑥구간에서 PWM이 완전히 on 상태를 유지하며 충전이 완료된다.

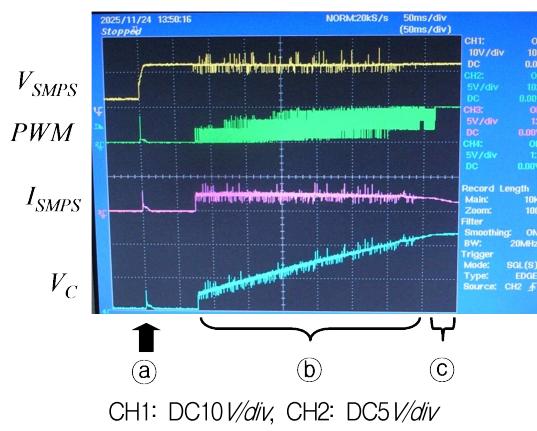


그림 8. 정전류 제어 실험결과
Fig. 8. Result of constant current control experiment

이상의 실험 결과에 따라 SMPS 및 커패시터에는 과전류가 흐르지 않는 안전한 상태로 충전이 완료됨을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 저가격, 소형화의 특성으로 인해 현재 대부분의 전자기기에 사용되는 SMPS를 대출력 오디오 시스템에 적용할 때 발생되는 문

제점을 분석하였다. 분석 결과 오디오 출력의 급격한 변화, 특히 베이스 충격음에 대해 SMPS의 전압 유지 특성이 추종하지 못해 출력저하가 발생함을 확인하였다. 이를 보완하기 위해 대용량 커패시터가 필수적이지만, 이 때 러시 전류에 의한 SMPS 기동불능 문제를 해결하기 위해 2차 PWM 회로를 적용해 정전류 제어하는 방법을 적용하였다. 이의 실험회로를 구성해 실험을 진행한 결과, 전원 투입 시 $20A$ 를 초과하는 러시 전류에 의해 SMPS가 기동불능 상태에 빠졌던 상태가 SMPS의 정격 이내인 $2A$ 의 일정한 전류로 빠른 시간에 대용량 커패시터를 충전할 수 있음을 확인하였다. 특히 충전 제한 전류는 소프트웨어에 의해 간단히 설정 및 변경할 수 있으며, 이에 따라 SMPS의 종류 및 커패시터의 용량에 관계없이 모두 적용할 수 있으며, 따라서 대출력 오디오 시스템 뿐만 아니라 모터 제어와 같이 순간적인 부하변동이 있는 분야 등에 적용될 수 있으리라 사료된다.

이 논문은 2025년 국립공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음

This work was supported by the research grant of Kongju National University in 2025

참고문헌

- [1] Michele Sclocchi, "Input Filter Design for Switching Power Supplies", National Semiconductor, 2010. https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/858/5582.National_5F00_Input_5F00_Filter_5F00_Design_5F00_for_5F00_Switchers.pdf
- [2] Abraham I. Pressman, Keith Billings,

- Taylor Morey, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill
ISBN : 978-0-07-159432-5
- [3] Giulia Di Capua, Nicola Femia, "A Novel Method to Predict the Real Operation of Ferrite Inductors With Moderate Saturation in Switching Power Supply Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, pp.2456 – 2464, Vol.31, No.3, Mar. 2016.
DOI : 10.1109/TPEL.2015.2438952
- [4] Kenneth Parker, Arne Thomas Haaland, Frode Vik, "Enhanced fine particle collection by the application of SMPS energisation", Journal of Electrostatics, pp. 110–116, Vol.67, No.2, May 2009,
DOI : 10.1016/j.elstat.2009.02.010
- [5] Navid Rasekh, "Prediction and Measurement of High-Frequency Power Losses in Magnetic Components under Power Electronics Excitation", University of Bristol, Mar. 2023. https://research-information.bris.ac.uk/ws/portalfiles/portal/379916115/Final_Copy_2023_10_03_Rasekh_N_R_PhD.pdf
- [6] Douglas Self, Audio Power Amplifier Design 6th Edition, Focal Press, Jun. 2013.
ISBN : 9780240526133 (0240526139)
- [7] Albert Malvino , David Bates , Patrick Hoppe, Electronic Principles, McGraw-Hill Education, Mar. 2020. ISBN : 9781260570564 (1260570568)
- [8] O.H. Schade, "Analysis of Rectifier Operation", IEEE Proceedings of the IRE, pp.341 – 361, Vol.31, Np.7, July 2006. DOI : 10.1109/JRPROC.1943.231350
- [9] Texas Instrument, LM3886 Audio Amplifier Series High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute, Mar. 2013, <https://ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf>
- [10] Microchip, tinyAVR Data Sheet ATtiny13A, Microchip Technology Inc. 2021. <https://ww1.microchip.com/>
- downloads/en/DeviceDoc/ATtiny13A-Data-Sheet-DS40002307A.pdf
- [11] Texas Instrument, LM2576XX Series Simple Switcher Power Converter 3-A Step-Down Voltage Regulator, Mar. 2023. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576hv.pdf>

저자 소개



이현창(Hyun-Chang Lee)

1986.2 단국대 전자공학과 학사

1989.8 단국대 전자공학과 석사

1996.2 단국대 전자공학과 박사

1996.3~2004 국립 천안공업대학
정보통신과 부교수.

2005.3~현재 국립 공주대학교 공과대학
정보통신공학과 교수.

<주관심분야> 멀티미디어 회로, 모터제어,
마이크로프로세서, 임베디드 소프트웨어