

소프트 스위칭 기술을 이용한 오디오용 파워앰프

서동현, 조보형
서울대학교 전기공학부

ZVT-PWM Amplifier for Audio Applications

D.H.Seo, B.H.Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Abstract - This paper presents a Class-D type switched mode audio power amplifier employing ZVT(Zero-Voltage-Transition) soft switching technique. In order to obtain a wide bandwidth and lower distortion for an audio amplifier a high switching frequency is essential.

The ZVT switching scheme enables a high frequency switching without sacrificing the efficiency much as in a hard switching. A prototype amplifier is built to demonstrate the feasibility of this technique for the audio power amplifier.

1. 서 론

대부분의 선형앰프는 트랜지스터가 선형영역에서 동작하기 때문에 효율이 낮은 단점을 갖고 있다. 이러한 선형앰프의 낮은 효율을 극복하기 위하여 펄스폭 변조(PWM:Pulse Width Modulation)를 이용한 스위칭 앰프가 고안되었다.

스위칭앰프는 가청 주파수까지 대역폭을 얻기 위하여 고주파로 스위칭을 해야한다. 낮은 스위칭 주파수에서 스위칭 앰프를 동작시킨다면 가청주파수까지의 대역폭을 얻기 힘들뿐만 아니라, 고주파 영역에서 나타나는 위상의 급격한 변화에 의해서 음색을 왜곡시키는 현상이 나타난다. 그러나 고주파 스위칭을 할 때 나타나는 손실로 인하여 고주파 스위칭은 효율을 떨어뜨리는 주요한 요인이 된다. 그러므로 고주파로 동작하면서 스위칭 손실을 막는다면 앰프의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러므로 고주파로 동작시키면서 고효율을 유지시키기 위하여 여러 가지 소프트 스위칭 기술이 제안되었다.

기존의 소프트 스위칭 기술을 이용한 앰프는 인덕터에 흐르는 전류 리플을 증가시키는 방법으로, 인덕터에 흐르는 전류의 방향이 MOSFET이 켜지기 전에 바뀌어 MOSFET에서 영전압 스위칭(ZVS : Zero Voltage Switching)을 가능하게 한다.[1]-[3] 이 방법은 인덕터에 흐르는 전류 리플을 증가시키기 때문에 영전압 스위칭이 일어나는 MOSFET에서는 스위칭 손실을 줄일 수 있지만 반대편 MOSFET에서는 큰 전류가 흐르기 때문에 OFF시 발생하는 스위칭 손실은 오히려 증가하게 된다. 또한 모든 부하에서 영전압 스위칭 조건을 만족하기 위해서는 전류 리플의 크기가 커져야 하므로 소자의 전류 정격이 커지는 문제가 있다. 또 출력 전압이 작을 경우에 앰프의 내부의 기생소자에 의한 손실이 증가하게 된다.

전류와 전압의 최대값을 작게 유지하면서 MOSFET이 켜질 때의 스위칭 손실을 줄이기 위한 방법으로 ZVT-PWM(Zero-Voltage-Transition PWM)이 제안되었다.[4]

이 기술은 MOSFET이 켜지기 바로 직전에 보조회로(auxiliary circuit)에 의해서 주 MOSFET의 V_{DS} 에

영전압을 만들어 주는 방법으로 스위칭하는 짧은 순간에만 공진을 이용하므로 공진형 컨버터에 비해 스위치에 걸리는 전류와 전압을 증가시키지 않고 영전압 스위칭을 하는 장점이 있다. 또한 공진형 컨버터의 영전압 스위칭 조건이 부하에 민감한 것에 비해 ZVT-PWM 컨버터는 넓은 범위에 걸쳐 영전압 스위칭 조건을 만족한다. 그리고 보조회로가 동작하는 순간은 주회로(main circuit)가 동작하는 시간에 비해 짧으므로 일반적인 PWM과 유사한 동작특성을 보여준다. 그러므로 PWM회로에 적용할 수 있는 제어기법을 적용할 수 있다.[4]

이 논문에서는 ZVT-PWM 기술을 이용하여 동작주파수가 400kHz인 20W 오디오용 파워 앰프를 설계하고 제작하는 방법을 설명한다. 그림 1.1은 제안하는 ZVT-PWM 앰프의 회로이다.

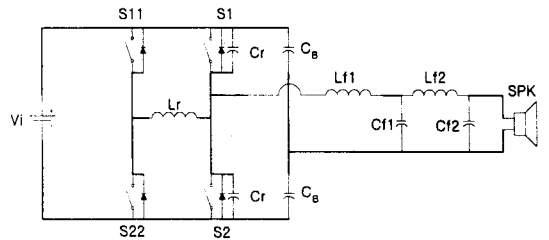


그림 1.1 ZVT-PWM 앰프

2. ZVT-PWM 앰프

2.1 동작원리

ZVT-PWM 앰프의 동작원리는 주 MOSFET(S1 또는 S2)이 켜지기 직전에 보조회로의 MOSFET(S11 또는 S22)을 켜서 주 MOSFET 있는 커패시터(Cr)와 인덕터(Lr) 사이에 공진(resonance)을 이용하여 영전압 스위칭을 가능하게 한다. 출력 전류가 단방향일 때에는 ZVT-PWM 컨버터(그림 2.1)와 동작원리가 같다.[4]

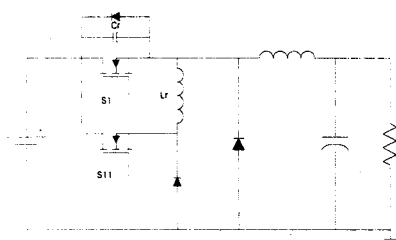


그림 2.1 ZVT-PWM Buck 컨버터

스위칭 주기가 입력신호의 주기에 비해 무척 작으므로 스위칭하는 순간에 인덕터(L)에 흐르는 전류는 일정하다고 볼 수 있다. 출력 전류가 전원에서 부하로 흐를 때 인덕터에 흐르는 전류를 전류원으로 가정한 시간에 따른 ZVT-PWM 앰프의 스위칭 순간에서의 전류와 전압의 파형은 그림 2.2와 같다. 이 동작모드에서는 S1이 영전압 스위칭하기 위해 S1이 ON되기 바로 직전에 S11을 ON시킨다. 그리고 S2는 인덕터에 흐르던 출력전류에 의해 영전압 스위칭을 한다. 그러므로 전류의 방향에 관계없이 한 스위치를 영전압 스위칭을 하게 하면 다른 스위치는 자동적으로 영전압 스위칭을 하므로 보조회로를 구동할 필요가 없다. 따라서 보조 스위치를 구동하는 신호와 인덕터에 흐르는 전류의 방향을 고려하여 보조 스위치를 구동하는 게이트 전압을 발생한다. (그림 2.6)

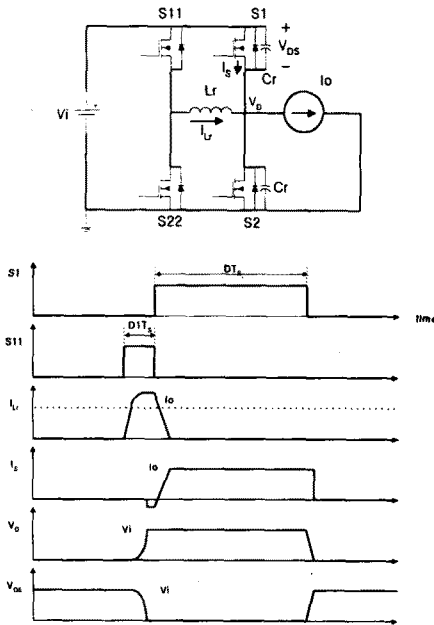


그림 2.2 ZVT-PWM 앰프의 스위칭 순간의 파형.

위의 경우와 반대로 인덕터의 전류가 부하에서 전원쪽으로 흐르면 S2가 ON되기 직전에 S22가 ON되어 영전압 스위칭을 가능하게 한다.

보조 MOSFET의 duty ratio는 Lr에 흐르는 전류가 증가하여 출력 전류보다 커지게 되는 순간 S1과 S2에 병렬로 연결된 Cr과 공진을 일으켜 주 MOSFET의 VDS에 영전압을 만들도록 설계되어야 한다. 그러므로 ZVT-PWM 앰프의 영전압 스위칭 조건은 다음과 같다.

$$D_1 T_s \geq L_r \frac{I_o}{V_i} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r (2C_r)} \quad (1)$$

전류가 한방향으로 흐르고 있을 때의 전압증폭비는 다음과 같다.

$$M = \frac{V_o}{V_i} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2 \left[1 + \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{T_r}{T_s} \right) \right]} \times \left[(D + D_1) - \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_r}{T_s} \right) + \sqrt{\left[\left((D + D_1) - \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_r}{T_s} \right) \right)^2 + \frac{r}{\pi} \left(1 + \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{T_r}{T_s} \right) \right) \left(\frac{T_r}{T_s} \right) \right]} \right]$$

여기에서 Ts는 스위칭 주기이며, D와 D1은 각각 주 스위치와 보조 스위치의 duty ratio이다. Tr, r, Zn은 각각 공진주기, 표준화한 부하와 특성 임피던스를 나타낸다.

$$T_r = 2\pi \sqrt{L_r (2C_r)}$$

$$r = \frac{R_L}{Z_n}$$

$$Z_n = \sqrt{\frac{L_r}{2C_r}}$$

2.2 설계과정

ZVT-PWM 앰프의 설계과정은 다음과 같다.

1. 주 스위치(main switch)에서의 도통 손실을 줄이기 위해 Rds(on)이 작은 MOSFET을 선택한다. 이때 MOSFET의 Coss를 Cr로 이용할 수 있다.
2. 보조 스위치(auxiliary switch)에 흐르는 평균 전류는 평균 출력 전류에 비해 작으므로 전류 정격이 작은 MOSFET을 선택한다. 일반적으로 주 MOSFET의 전류정격의 약 1/3정도 되는 MOSFET을 선택한다.
3. 영전압 스위칭 조건을 만족하는 D1과 Lr을 선택한다. 이때 최대 출력전류에서 영전압 스위칭 조건을 만족하는 D1과 최대 Lr의 그래프는 아래와 같다. (그림 2.3)

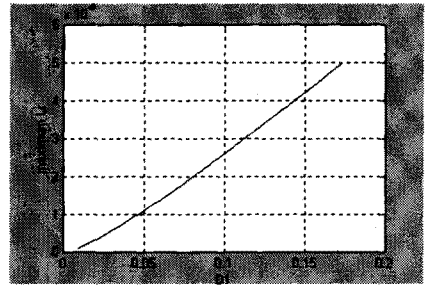


그림 2.3 D1과 Lr의 그래프

D1이 크면 영전압 스위칭 조건을 쉽게 만족할 수 있지만 실제로 사용할 수 있는 duty가 줄어들고, 왜곡이 증가한다. 그러므로 되도록 D1의 크기를 줄여 설계한다.

위의 과정에 의해 400kHz, 20W에 앰프에 대해 주 스위치로는 IRF540, 보조 스위치로는 IRLZ14, D1=0.08, Lr=1.3uH, Cr=560pF를 선택했다.

Duty ratio에 따른 전압의 증폭비는 그림 2.4에서와 같이 이상적인 Buck 컨버터의 전압 증폭비와 유사한 선형특성을 갖고 있다.

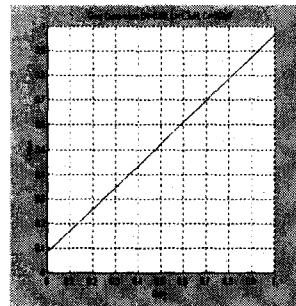


그림 2.4 Duty와 전압증폭비

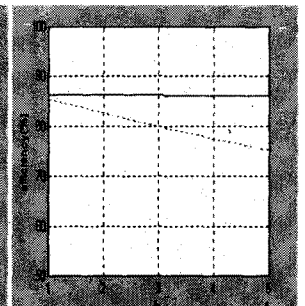


그림 2.5 스위칭 주파수와 효율

(실선:soft 스위칭, 점선:hard 스위칭)

위에서 설계한 값으로 효율을 계산한 결과 400kHz로 동작할 때 hard 스위칭하는 일반 Class-D 앰프보다 더 나은 효율을 보여준다.(그림 2.5) 스위칭 주파수가 약 100kHz보다 낮은 영역에서는 hard 스위칭이 더 나은 효율을 보여주는데, 이것은 보조회로에서 소모되는 손실이 영전압 스위칭을 하여 얻을 수 있는 효율의 이득보다 크기 때문이다. (제어회로에서 발생한 손실은 고려치 않았다.)

2.3 실험 및 결과

앞에서 선택한 소자와 값으로 앰프를 다음과 같이 구성하여 실험하였다.(그림 2.6)

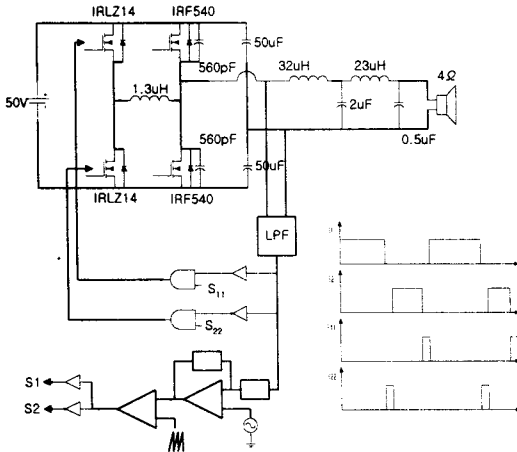


그림 2.6 ZVT-PWM 앰프의 회로도 및 스위칭도

그림 2.7은 MOSFET이 스위칭 하는 순간을 보여주고 있다. 스위칭을 하기 바로 전에 MOSFET의 V_{DS} 가 0V로 유지되어 있는 순간에 스위칭 ON 신호가 들어간다.

그림 2.8은 1.5kHz와 15kHz에서의 입력전압과 출력전압의 파형이다. 1.5kHz에서는 위상차가 없으며 15kHz에서는 위상차 지연이 약 50° 이다.

그림 2.9는 앰프의 전달함수를 나타낸다. 대역폭이 40Hz에서 40kHz이며 대역폭 안에서 평탄한 전압이득을 보여준다. 또한 가청 주파수대역의 고주파 영역에서의 위상차가 선형앰프의 그것과 비등하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 실제 실험에서는 앰프의 효율은 70%로 예상했던 수치보다 떨어졌는데, 이것은 보조회로의 기생성분들이 공진을 일으켰기 때문이다. 또한 실험의 대상이 됐던 앰프가 비교적 낮은 전력에서 동작해서 전체 출력에 대한 손실이 큰 비율을 차지했기 때문이다.

3. 결 론

스위칭 앰프가 가청주파수 대역을 포함하는 대역폭을 갖고 고주파에서의 음색의 변질을 막기 위해서는 고주파로 스위칭을 하는 방법이 필수적이다.

본 논문에서는 ZVT 스위칭 방법을 이용하여 스위칭 손실과 스위칭 잡음을 줄일 수 있음을 모의 실험과 시제품을 통하여 그 타당성을 밝혔다.

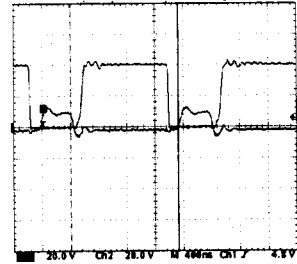


그림 2.7 영전압 스위칭

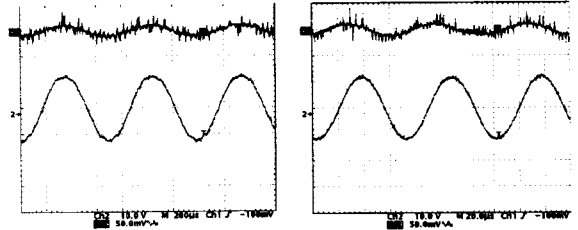


그림 2.8 출력파형

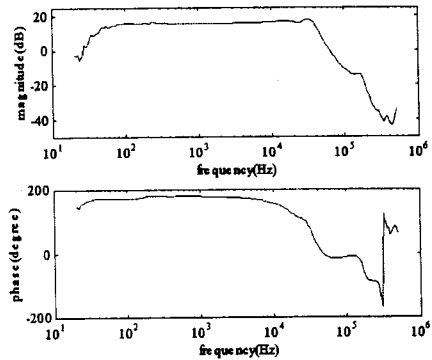


그림 2.9 앰프의 전달함수

[참 고 문 헌]

- [1] D.M.Sable, F.C.Lee and B.H.Cho, "A Zero Voltage-Switching Bidirectional Battery Charger/Discharger for the NASA EOS Satellite", IEEE APEC, Feb. 27, Vol.2, pp614-621, 1992
- [2] Ronaldo C. Oliveira, Ernane A.A.Coelho, Joao B.Vieira Jr., Luiz C. Freitas and Valdeir J. Farias, "Soft Switching Power Amplifiers for Audio Applications", IEEE APEC, Vol2, pp799-804, 1997
- [3] N.K.Poon, W.H.Lau and Henry Chung, "A ZVS PWM Converter for A Full Audio Band Amplifier", IEEE PESC, June 23-27, Vol.2, pp1261-1265, 1996
- [4] Guichao Hua, Ching-Shan Leu, Yimin Jiang and F.C.Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol9, No.2, pp213-219, Mar. 1994