

Multi-State PWM 방법을 이용한 디지털 앰프의 성능 개선

Improvement of Digital Amplifier Performance using Multi-State Pulse-Width-Modulation

진종언*, 성평모
서울대학교 전기·컴퓨터공학부
pekoe@acoustics.snu.ac.kr

두세진**
동아방송대학 방송기술과
sjdoo@dab-c.ac.kr

요약문 디지털 앰프, 혹은 D급 앰프에서는 기존의 앰프와 달리 펄스 폭 변조(PWM) 방식을 사용한 스위칭을 이용하므로 90%를 상회하는 고효율을 달성한다고 알려져 있다. 하지만, 입력 레벨이 작은 신호가 많은 일반적인 경우에도 전원 전압에 해당하는 큰 전압으로 스위칭하게 되므로 작은 입력 시의 효율은 상당히 떨어진다. 본 논문에서는 기존 앰프보다 효율을 높일 수 있는 4, 5-State PWM 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션 결과 기존 PWM 사용 앰프에 비하여 대략 효율이 40% 상승하여 방열판과 앰프의 크기를 줄일 수 있다. 또한 스위칭 주파수가 기존 방법 대비 1/2로 감소하므로 디지털 앰프의 실용화에 가장 큰 걸림돌이었던 전자파 방출의 양도 크게 감소한다.

I. 서론

앰프를 이용함에 있어서, 사이렌을 울린다거나 하는 특수한 케이스를 제외하고는 풀 파워(full power)를 이용하는 경우는 드물다. 일반적으로 큰 음량인 경우가 최대 출력의 1/3, 보통 음량의 경우는 1/8 정도를 출력하게 된다[1]. PA 시스템일 경우에도 대출력이기 때문에 효율을 극대화시키는 것이 가격, 소비전력 및 크기(치수)라는 여러 가지 면에서 유리하게 된다. PWM 신호를 스위칭하는 D급 앰프나, 일반적으로 PCM 신호를 받아서 PWM 신호로 변환 후 고속 스위칭 MOSFET 을 이용하여 증폭시키는 디지털 앰프는 기존의 아날로그 앰프에 비해 효율이 높다고 알려져 있다[2]. 예로 B급 앰프의 경우, 전원 이용 효율이 이론상 78.5 %이지만 일반적으로 사용되고 있는 실제 B 급 앰프의 경우 45~55 % 정도의 낮은 효율을 가진다. 이에 반하여 디지털 앰프의 경우, 이론적으로 100%의 효율을 지니고 있다. 하지만 실제로 스위칭 손실과 MOSFET

에서 발생하는 열 등으로 인한 전도 손실을 고려하면 최대 70~80 % 정도의 전원 이용 효율을 지니고 있는 셈이다. 더욱이 입력신호의 크기가 작을수록 효율은 급격히 떨어진다. 이는 여러 가지 이유가 있겠지만, PWM 증폭 과정에서 오디오 신호의 크기와 무관한 스위칭 버스 전압(V_{DD})의 공급이 문제시 된다. 본 논문에서는 디지털 앰프의 효율을 더욱 올릴 수 있는 방안으로 저출력 상태와 고출력 상태를 다단계로 구분하여 신호를 증폭시키는 방법을 제시한다. 이 경우 대기 전압이 감소하여, 전력 손실을 줄일 수 있을 뿐 아니라 크기와 무게, 가격을 낮출 수 있고 실용화의 장애요소의 하나였던 전자파 방해 또한 감소시킬 수 있다.

II. PWM 앰프의 일반적인 특성

PWM 증폭을 이용하는 디지털 앰프의 동작 원리는 다음과 같이 크게 4 단계로 나누어 볼 수 있

다[2].

- 1) 디지털 방식으로 샘플링된 오디오 신호를 입력받는다.
- 2) 위에서 입력된 신호를 펄스폭 변조(PWM) 신호로 바꾼다.
- 3) PWM 신호를 고속 스위칭 MOSFET을 이용해 증폭한다.
- 4) 증폭된 신호를 저역 통과 필터에 통과 시켜 증폭된 오디오 신호로 바꾼다.

D급 앰프의 경우 디지털 신호 변환 블록 대신 아날로그 오디오 입력 신호를 톱니 파형과 비교하여 PWM를 발생시키는 아날로그 방식으로 되어 있으며, 여기서 관심있는 MOSFET을 이용한 PWM 증폭 방법은 동일하다.

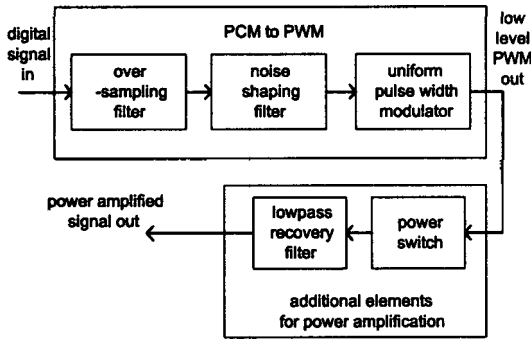


그림 1. 디지털 앰프 블록도

2.1 Full-Bridge PWM 증폭회로의 Efficiency

풀 브릿지 회로에서 Class-D 의 효율은 회로 안의 MOSFET 드레인과 소스사이 저항값인 $R_{DS(ON)}$ 과 필터 저항 및 부하저항의 합 대 부하 저항의 비로 나타난다[3]. 따라서 높은 효율을 위해서는 MOSFET의 $R_{DS(ON)}$ 저항값과 필터 저항이 부하 저항과 비교하였을 때 작아야 한다. 중단부 부하 전력 및 전제 전력을 버스 전압(V_{DD})으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{LOAD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{DD}^2}{(2 \cdot r_{DS(ON)} + R_L + R_X)^2} \cdot R_L \quad (1)$$

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{DD}^2}{(2 \cdot r_{DS(ON)} + R_L + R_X)} \quad (2)$$

이 경우 Class-D 앰프의 효율은 부하 전력과 전체 전력의 비로 다음과 같이 전개되며, 스위칭 손실을 전혀 고려하지 않은 이상적인 값이다.

$$\eta = \frac{R_L}{2 \cdot r_{DS(ON)} + R_L + R_X} \quad (3)$$

하지만 실제 MOSFET 에는 스위칭 손실과 Recovery Power 손실이 존재하며 이를 계산해 보면,

$$P_{COMM} = \frac{1}{2} \cdot f_{PWM} \cdot V_{DD} \cdot I_L \cdot t_{COMM} \quad (4)$$

$$P_{RR} = \frac{1}{4} \cdot V_{DD} \cdot I_{RATE} \cdot t_{RR}^2 \cdot f_{PWM} \quad (5)$$

과 같이 나타난다. 풀 브릿지 회로의 경우 4개의 MOSFET을 사용하므로 손실을 고려하지 않는 경우(식 2)에 손실 분만큼 더해주었다.

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{DD}^2}{(2 \cdot r_{DS(ON)} + R_L + R_X)} + \dots + 4 \cdot (P_{COMM} + P_{RR}) \quad (6)$$

$$I_{AVG} = \frac{V_{BUS}}{R_{TOTAL}} \cdot \frac{2}{\pi} \quad (7)$$

다음은 모든 손실을 고려한 효율을 나타내고 있다.

$$\eta = \frac{R_{LOAD}}{(2 \cdot r_{DS(ON)} + R_{LOAD} + R_X)} \cdot \frac{16 \cdot V_{BUS}}{1 + f_{PWM} \cdot [\frac{16 \cdot V_{BUS}}{r_{DS(ON)} \cdot I_{RATE} \cdot (2 \cdot r_{DS(ON)} + R_{LOAD} + R_X)} + \dots + 2 \cdot I_{RATE} \cdot \frac{t_{RR}^2}{V_{BUS}} \cdot (2 \cdot r_{DS(ON)} + R_{LOAD} + R_X)]} \quad (8)$$

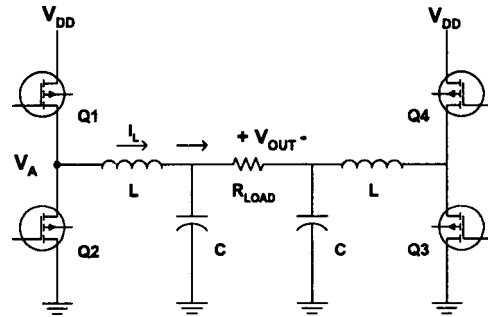


그림 2. Full-bridge PWM 증폭 회로

2.2 전자기파 장해

디지털 앰프에서는 비선형 왜곡을 줄이기 위한 방법 중의 하나로 oversampling 필터를 이용하여 샘플링 주파수를 높인다[2,4]. CD 표준인 44.1 kHz 의 4배 내지 32배의 높은 주파수로 샘플링 주파수를 높이게 되며 이로 인하여 발생하는 전자기파는 AM, FM 등 통신기기에 잡음으로 영향을 주게 된다. 파형이 일정할 경우, 전자기파의 세기는 회로에

효르는 전압과 전류에 비례하므로 디지털 앰프의 출력단에서 전압과 전류를 감소시키는 것은 발생 전자파를 감소시키는데 큰 역할을 하게 된다.

III. 개선방안

기존의 PWM 방법은 두 가지 전압 레벨을 가지고 있는 2-State 방식이라고 볼 수 있다. 여기서 전압 레벨을 좀 더 세분화하여 효율을 끌어올릴 수 있는데, 보통 음악 신호는 1/3 파워 이하라고 생각하여 피크 전압(V_{in})과 버스 전압(V_{DD})의 크기가 같다고 가정했을 때 1:2 크기로 버스 전압을 구분해 주면 된다. 즉 아래 그림과 같이 4-State 방식으로 회로를 설계해 볼 수 있다.

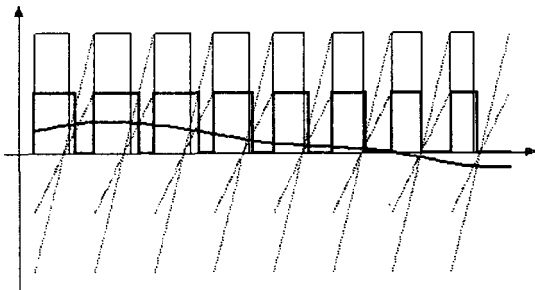


그림 3. 4-State PWM 방식

실제로 풀 브릿지 회로를 이용한 일반적인 디지털 앰프의 경우 위와 같은 아이디어가 적용이 되는지 간단한 측정을 해 보았다. V_{in} 는 각각 10V, 20V, 30V 공급을 하였을 때 입력 전원 측의 전압·전류를 이용하여 얻어지는 전력을 계산하고, 부하 저항에 걸리는 출력 전압 값을 측정하여 부하 전력을 계산하였다. 그에 따른 결과 그래프를 그림 4 및 그림 5 에 나타내었다.

그래프에 의하면 세 가지 경우 모두 변조폭이 최대가 되는 출력일 때는 효율이 높아지지만, 변조폭이 작아질수록 효율은 점점 작아져서 출력이 없어도 스위칭 손실만큼의 파워를 소모하므로 0%에 수렴하게 된다. 그림 4 에서 보면 작은 음악 신호에 해당하는 4 W 정도의 신호를 내보낸다고 할 때 버스 전압이 작을수록 효율이 뛰어나다. 예를 들어 버스 전압이 20V일 때에 비하여 10V일 때는 1.5W~4W 출력시 효율이 40% 가량 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 PWM 전압 레벨을 늘리는 Multi-State 방식을 이용하여 효율을 극대화시킬 수 있

다. 게다가 전압 차이와 전류의 흐름이 작아자므로 EMI 의 세기도 감소한다.

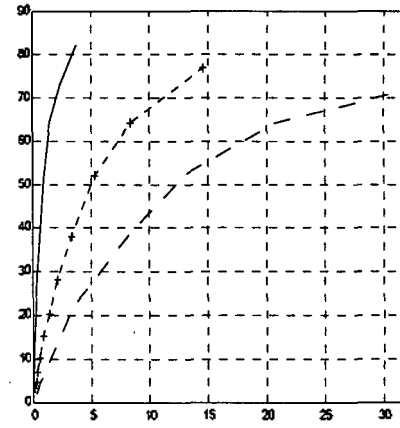


그림 4. Efficiency VS Output Power[W] (a)

(Solid: $V_{in}=10V$, Dotted: 20V, Dashed: 30V)

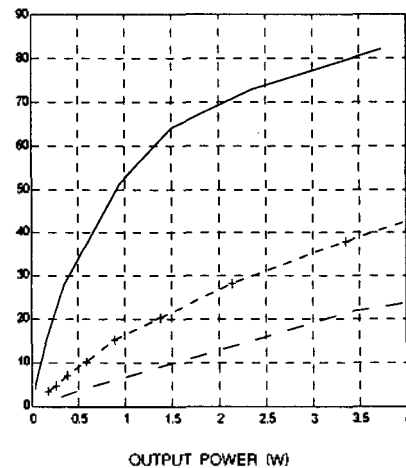


그림 5. Efficiency VS Output Power[W] (b)

(Solid: $V_{in}=10V$, Dotted: 20V, Dashed: 30V)

실험 결과와 비교하기 위한 최대 출력시 효율을 (식 8)을 이용하여 계산해 보자. 앰프에 사용된 MOSFET 은 IRF530N 이며, 데이터 북에 의하면 t_{on} 은 130ns, I_{rate} 는 100A/ μ s 이다. 계산 결과는 다음과 같다.

$$R_{LOAD} = 8[\Omega], r_{DS(on)} = 0.11[\Omega], f_{PWM} = 352.8[kHz]$$

$$V_{DD} = 30[V], t_{on} = 130[ns], I_{RATE} = 100[A/\mu s]$$

$$\eta_{MAX} \approx 74 \% @ V_{DD} = 30V \quad (9)$$

이 값은 그림 4 의 결과와 유사함을 알 수 있다.

실제로 회로를 구현할 때 Lower Gate Driver에 의해 구동되는 MOSFET, Higher Gate Driver에 의해 구동되는 MOSFET 회로를 만들어서 입력신호의 크기에 따라 Lower 또는 Higher 스위칭 제어를 하면 된다. 또한, 이를 이용하여 위에서 제시한 4-State 뿐 아니라 5-State 이상으로 확장 구현이 가능하다.

IV. 결론

현재 디지털 앰프를 개발하고 실제 양산하는데 많은 경비 절감 및 성능 개선을 요구한다. 본 논문의 실험 결과에 의하면 실제 앰프 설계 시, Multi-State 방식의 디자인으로 효율 증가 및 전자파 감소 등의 잇점이 있음을 알 수 있고, 이를 이용하면 크기와 소비 전력이 적은 제품의 개발이 가능할 것이다. 본 연구 결과를 이용하면 포터블 오디오의 경우 앰프 소비전력의 감소로 전지 사용 시간을 연장할 수 있어 제품 경쟁력이 강화되며 500W 등 대출력 앰프의 경우는 소비 전력 감소라는 잇점 외에 크기와 무게, 가격을 모두 낮출 수 있어 앰프의 소형 경량화에 일조하게 되고, 발생 전자파의 감소로 신뢰성 있는 제품 개발이 가능하게 된다.

본 연구는 더 나아가 5-State 등의 방식으로 개선을 진행하여 성능 개선을 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] "Amping Up: Figuring Power Requirements", Recording Engineering Production magazine, pages 38-41, May 1991.
- [2] "디지털 앰프 기술 개발에 관한 연구 보고서", 통산산업부 공업기반기술 개발사업, 1995.
- [3] George E. Danz, "Class-D Audio II Evaluation Board", Harris Semi-conductor, 1995.
- [4] J. C. Candy, G. C. Temes, "Oversampling Delta-Sigma Data Converters", IEEE Press 1992.
- [5] "2-W STEREO CLASS-D AUDIO POWER AMPLIFIER", Texas Instruments, 2000.
- [6] Jeffrey D. Sherman, "Class D Amplifiers Provide Efficiency for Audio Systems", EDN, 1995.
- [7] Vrej Barkhordarian, El Segundo, "Power MOSFET Basics", International Rectifier.