3상 풀 브리지를 이용한 전류제어형 D급 스테레오 앰프

송권일*, 윤인국*, 오덕진*, 김희준**
한양대학교 전기공학과*
한양대학교 전자 컴퓨터 공학부**
전화 : (0345) 400-4042 / 팩스 : (0345) 406-2325

Current Controlled Class-D Stereo Amplifier Using Three-Phase Full Bridge

Song Kwon-Il*, Youn In-Kook*, Oh Duk-Jin*, Kim Hee-Jun**
Electrical Engineering Hanyang University*
School of Electrical and Computer Engineering Hanyang University**
E-mail : aliaski@yahoo.co.kr

Abstract

This paper presents a simple class-D stereo amplifier using 3-phase full bridge circuit configura -tions which is controlled by a new current control switching method. Although this class-D amplifier has an only one current control loop with the proposed switching method, a good performance can be obtained. In this paper, a strategy for driving stereo signal amplifier with 3-phase full bridge is discussed. With the experimental results, usefulness of the proposed amplifier is confirmed.

1. 서론

가청 주파수 이상의 주파수 대역을 가져야 하는 오디오 앰프는 주로 선형 트랜지스터를 사용한 A급, B급, AB급 선형 앰프로 구현된다. 이러한 선형 앰프들은 회로 동작 원리상 매우 나쁜 효율을 가지고 있으나, 이는 원음을 그대로 재생하여야 한다는 오디오로써의 기능적 측면을 고려할 때 감수해야 하는 필수적 사항이다. 그러나 최근 반도체 스위칭 소자의 성능이 향상됨에 따라, 이를 이용한 D급 증폭기를 오디오의 메인 앰프로 사용함으로써 기존의 오디오 앰프가 가지고 있는 저효율이라는 단점을 극복하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 디지털 앰프라고도 불리우기도 하는 이 D급 오디오 앰프는 효율의 측면에서는 선형 앰프에 비하여 월등히 우수하지만, 무한대의 스위칭 주파수를 갖지 않는 한 음질의 측면에 있어 선형 앰프에 비해 떨어질 수 밖에 없다. 따라서 이러한 D급 앰프의 성능을 향상시키기 위하여 스피커를 포함한 전체 시스템의 정확한 모델링에 의하여 설계된 고차의 수동필터들이 채용되기도 하며, 오디오 주 전력은 D급 앰프로 공급하고 단점을 보완하기 위하여 높은 주파수 대역의 소용량 선형 앰프를 보상기로 채용하기도 한다. 한편, D급 앰프를 구동하기 위한 제어 방법으로 일반적으로는 삼각파 비교 PWM을 채용하지만, 시그마 델타 변조법이나 PWM에 슬라이딩 모드 제어기법들을 도입하기도 하였다. 그리고 대부분의 경우 전압부궤환에 의하여 앰프를 제어 하나, 전압부궤환과 전류부궤환을 동시에 사용하여 시스템 성능을 향상시킨 사례도 발표된 바도 있다.[1-4]

이러한 D급 오디오 앰프들을 구현할 때 고도의 제어 기법과 고성능의 필터에 우선하여 스위칭 소자의 좋은 특성과 빠른 스위칭 기술은 필수적으로 요구되는 사항이다. 본 논문에서는 스위칭 데드타임이 거의 적용되지 않는 고주파 스위칭 기술을 적용한 3상 풀브리지 회로를 이용하여 스피커 전류를 직접 제어하는 전류제어형 스테레오 앰프를 제안하였다. 3상 풀 브리지 회로를 스테레오 앰프로 구동시키기 위한 방법을 논하였으며 시험 제작된 앰프로 수행된 실험 결과를 통하여 제안한 3상 풀브리지 회로를 이용한 스테레오 앰프의 유용성을 확인하였다.

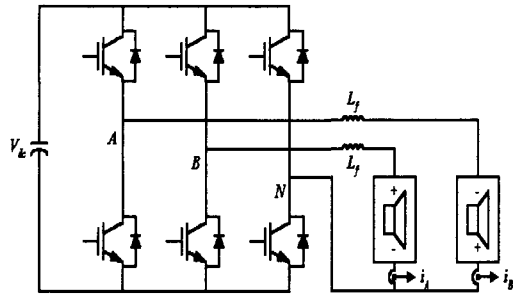

그림 1 3상 풀 브리지를 이용한 스테레오 앰프 구성

2. 3상 풀브리지를 이용한 스테레오 앰프

그림 1에 제안하는 3상 풀브리지를 이용한 전류제어형 스테레오 앰프의 주회로를 나타내었다. A상과 B상에 스테레오를 위한 두 채널의 스피커가 각각 연결되고 N상은 이들의 공통 상이 된다.

일반적으로 D급 스테레오 앰프는 하프 브리지 인버터 앰프 2개의 채널을 이용하거나 단일 직류 전원에서 동작시키는 경우에는 풀 브리지 인버터 앰프 2개의 채널을 이용한다. 원래 3상 풀 브리지 인버터는 3상의 부하 구동을 위해 사용되는 것이기 때문에 그림 1과 같은 구성은 3상 Y부하의 한 상이 단락된 상태 또는 3상 Δ부하의 한 상이 개방된 것과 같은 상태로 볼 수 있으며 3상 V결선과 같은 구성임을 알 수 있다. 따라서 일반적인 3상 인버터를 구동하는 경우와는 달리 각 상의 스위칭 상태에 따른 출력 전압의 벡터는 표 1에 나타낸 것과 같이 표시된다.

표 1 전압 벡터 테이블

S(A),S(B),S(N)	V_{An}	V_{Bn}	V_{Nn}	V_{AN}	V_{BN}
0,0,0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0	0
0,0,1	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
0,1,0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0	$+V_{dc}$
0,1,1	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-V_{dc}$	0
1,0,0	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+V_{dc}$	0
1,0,1	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	0	$-V_{dc}$
1,1,0	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+V_{dc}$	$+V_{dc}$
1,1,1	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	0	0

그러나 이를 3상 인버터와 같은 방식으로 운전시키는 데에는 아무런 제약이 따르지 않는다. 다만 N상의 전류는 A, B상 전류의 합이 되므로 N상의 소자에 과부하가 걸릴 수 있다.

스테레오 신호의 경우 두 채널의 분리도에 따라 틀리겠지만 일반적인 음악에 있어서는 두 채널 신호가 유사하다. 즉 큰 소리들의 경우에는 입체적인 에코 효과를 주기 위한 약간의 위상 차 정도이며, 주로 높은 주파수 영역의 신호들만이 두 채널에 분리된다. 음악을 믹싱할 때 특정 악기의 소리를 한 채널에만 집중시키는 경우도 있지만 전반적으로는 두 채널의 사운드는 유사하게 된다. 따라서 두 채널을 그대로 동작 시키면 N상의 전류는 나머지 상들의 전류의 합이 되어 곤란하다. 그러나 스피커에는 극성이 있으므로 그림 1에 표시한 것과 같이 한 채널의 스피커를 역극성으로 연결하고, 스테레오 신호의 한 채널은 반전시켜 제어하면 N상에는 결국 두 상 전류의 차만 흐르게 되므로 본 논문에서 제안하는 바와 같이 스테레오 앰프로의 응용에는 큰 문제가 되지 않는다.

한편, D급 앰프는 직류 전압을 고주파 스위칭에 의하여 출력 변조하기 때문에 원래의 신호와 더불어 스위칭 주파수의 신호가 함께 출력된다. 일반적으로 스위칭 주파수는 가청 주파수 대역을 벗어난 수백 kHz 대역 이기 때문에 사람의 귀에는 들리지 않으므로 오디오라는 기능적 측면에 있어서는 이 스위칭 주파수대역의 신호는 아무런 제약을 주지 않는다. 그러나 주변 기기에 미칠 전자파 노이즈의 저감 및 불필요한 고주파 전력의 소모를 방지하기 위하여는 필터링을 하는 것이 좋다. 또한 낮은 주파수대의 신호 재생시 변조에 의해 발생되는 고조파분은 가청 주파수 내에 있기 때문에 필터링을 해야하는 것이 원칙이나 동일 주파수대의 원음 재생에 영향을 미치므로 필터링은 가청 주파수 이상의 신호에 대해서만 행하고 있다. 일반적으로 필터의 설계시 스피커를 RLC 수동부하로 해석하여 필터를 설계한다. 그러나 엄밀하게는 스피커 탄력에 의한 역기전력도 고려되어야 한다. 특히 대용량 콘 스피커의 경우 스피커 탄력이 상당하다. 또한 앰프의 출력단에는 단순히 스피커만 연결되는 것이 아니고 저음, 중음, 고음용 스피커를 집합한 스피커 박스에는 스피커 박스 자체의 필터가 채용된 경우도 있다. 결국 역기전력을 포함하는 비선형 스피커와 스피커 박스의 필터까지 모두 고려한다면, 실제 앰프의 출력단에는 어떤 종류의 부하가 걸릴지는 모르므로 적정 필터의 설계는 상당한 해석과 복잡한 회로가 적용되어야 한다. 따라서 앰프가 필터 및 부하에 대한 의존성을 작게 하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 과도한 고주파 신호의 제거와 전류제어시 스위칭 주파수의 제한

을 위하여 단순한 직렬 인덕턴스만을 채용하였다.

그리고 대부분의 오디오 앰프는 출력단 전압이 프리앰프의 출력전압에 대하여 선형성을 갖도록 메인 앰프를 구동한다. 그러나 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 콘 스피커의 원리는 코일 전류에 비례하는 토크가 콘을 구동시켜 진동을 재생하는 것이며 이 콘이 가진 탄력에 의하여 역기전력이 발생하므로 이러한 측면에서 스피커는 일종의 영구자석형 전동기와 유사한 특성을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 프리앰프의 출력신호를 지령전류로 하여 출력단의 전류제어를 행하도록 메인 앰프를 구성하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

먼저, 그림 1에 표시한 바와 같이 한 채널의 스피커를 역극성으로 연결하였으므로 해당 채널의 지령 전류는 반전을 시켜야한다. 또한 두 채널의 신호로부터 N상의 전류 지령을 발생시켜야 하므로 그림 2에 나타낸 바와 같이 3상의 전류지령 발생 회로를 구성하였다.

그림 3은 실험에 적용한 한 상분의 제어회로를 나타내는 것으로 이는 선형 전압 비교기에 의하여 뱅뱅제어기를 구성하여 전류제어를 행하고자 한 것이며, 지령 전류 극성에 따른 데드타임 최소화 스위칭 방법을 구현해 주는 제어 회로가 된다. 상세한 스위칭 신호 발생에 대한 타임챠트는 그림 4에 도시한 바와 같다.

실험에 있어 주 회로는 IRF540을 사용하여 3상 브리지를 구성하였으며 구동회로는 3개의 IR2110을 사용하여 단일 전원 구동회로를 구성하였다.

시험 제작된 앰프로 채널당 1kW의 출력이 가능하나 실험실 여건상 직류 전원 24V, 채널당 등가 부하저항 4 Ω으로 실험을 수행하였다. 이 경우 한 채널의 순시 피크 출력은 약 120W로 계산되지만, 스테레오로 구동을 행하기 때문에 각 채널이 이용하는 직류 전압은 평균적으로는 12V가 되고 필터 인덕턴스를 포함한 주회로의 전압강하 요소를 고려하면 채널당 평균 최대 출력 약 35W 이다.

그리고 실험에 있어서 45 μH의 필터 인덕턴스 직렬로 삽입하여 전류제어를 행하였다.

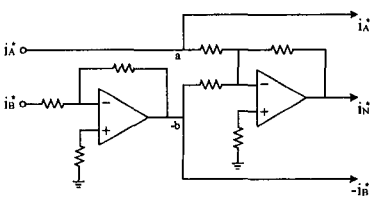

그림 2 지령전류 발생회로

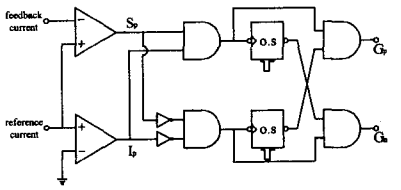

그림 3 1상분의 제어회로

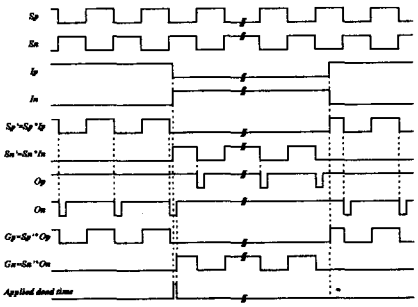

그림 4 스위칭 신호 발생 타임 챠트

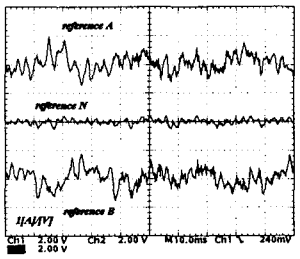

그림 5 각 상의 지령 신호 파형

먼저 그림 5는 지령전류 발생회로에서 출력되는 각 상의 지령신호로 이는 CD Player에서 출력되는 실제 음악신호를 프리앰프의 출력 신호로 가정하여 스테레오 지령으로 입력한 것으로, 전술한 바와 같이 두 채널의 신호의 크기는 유사하며 스테레오 효과를 주기 위한 차이의 신호 즉 본 실험에 있어 N상의 지령에 해당하는 신호의 크기는 아주 작음을 확인할 수 있다.

그림 6은 실제 음악 신호 지령에 의한 응답을 보여주는 것으로 두 채널 모두 추종이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 1kHz 정현파 지령에 대한 추종 파형과 이의 스펙트럼 분석 결과를 보여 주는 것으로 0.828%의 왜율을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 1kHz 구형파에 대한 지령 및 실제 신호의 스펙트럼으로 가청 주파수 내의 모든 주파수 성분에 대하여 그 응답이 매우 우수함을 알 수 있다.

끝으로 그림 10에 실제 음악신호의 증폭 시 입출력 신호의 옥타브 분석결과를 제시하였다. 이는 반음 단

위의 옥타브 분석 결과로, 로그 스케일임을 감안한다면 원음을 거의 다치지 않고 완벽하게 증폭하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 D급 오디오 메인 앰프로써, 3상 풀 브리지 회로를 이용한 출력전류 제어형 스테레오 앰프를 제안하였다. 전류제어를 위한 스위칭 방법으로 지령전류 극성에 따른 상하암 스위칭 소자 선택 스위칭 방법을 적용하여 스위칭 데드타임을 극소화 시킴으로써 시스템의 제어 성능을 향상시킴과 동시에 스위칭 소자의 암단락 가능성을 거의 배제시켜 전반적인 시스템의 안정성을 확보하였다. 또한 작은 직렬 필터 인덕턴스만을 채용하여 스피커 전류를 직접적으로 제어함으로써 원음재생에 충실하고자 하였으며, 실험결과로써 제안한 앰프의 유용성을 검증하였다.

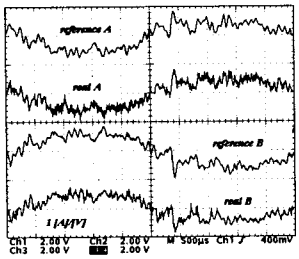

그림 6 음악신호에 대한 추종 결과

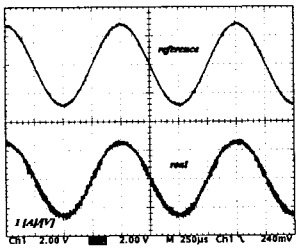

그림 7 1kHz 정현파 응답

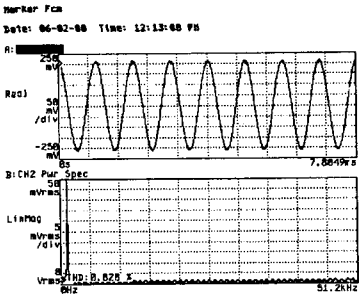

그림 8 1kHz 정현파 응답에 대한 스펙트럼

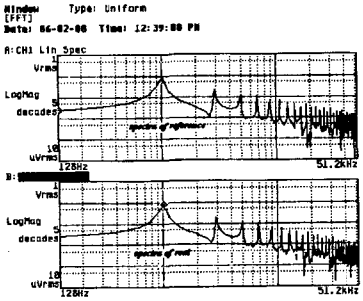

그림 9 1kHz 구형파 응답에 대한 스펙트럼

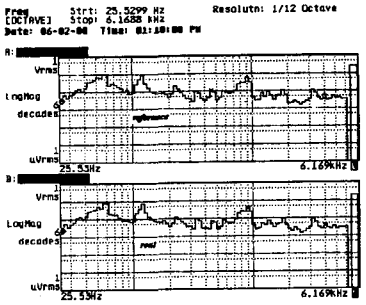

그림 10 입출력 옥타브 분석 결과

참고문헌

[1] F.A. Himmelstoss, K.H. Edelmoser, "High Dynamic Class-D Power Amplifier", IEEE Trans. CE, Vol. 44, No. 4, pp. 1329-1333, Nov. 1998.

[2] K.M. Smith et al., "Intelligent Magnetic-Amplifier-Controlled Soft-Switching Method for Amplifiers and Inverters", IEEE Trans. PE, Vol. 13, No. 1, pp. 84-92, Jan. 1998.

[3] R.C. Oliveira et al., "Switching Power Amplifiers with Soft Commutation for Audio Applications", IEEE Unknown Conf. Rec., pp.557-560, 1996.

[4] J.F. Silva, "PWM Audio Power Amplifiers: Sigma Delta Versus Sliding Mode Control", IEEE Unknown Conf. Rec., pp.359-362, 1998.

[5] 정재훈 외, "이중 부궤환에 의한 고효율 광대역 D급 오디오 증폭기", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 141-143, 1994.

[6] 조규민 외, "브리지 형태 PWM 변환기의 데드타임 최소화 방법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 F권, pp. 2715-2720, 1999.