

교류전기철도용 전력보상장치의 병렬 시스템 인터리빙 성능 비교분석

우제훈, 김지찬, 조종민, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Comparative Analysis of Parallel System Interleaving Performance of Power Compensator for AC Electric Railway

Jehun Woo, Jichan Kim, Jongmin Jo, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 단상 3레벨 조건에서 unipolar 및 bipolar PWM의 구현 및 동작에 대해 서술하였으며, 교류전기철도용 전력보상장치의 병렬 운전 상황에서 unipolar PWM과 bipolar PWM에 따른 인터리빙 효과에 대해 비교하였다. 또한, unipolar PWM 조건에서 전력보상장치의 3병렬과 4병렬 시스템의 인터리빙 결과에 대해 비교하였다. 이를 통해 단상 unipolar PWM을 사용한 병렬 시스템의 인터리빙이라는 특수한 조건에서는 PWM 캐리어의 180° phase shift가 포함되는 2병렬 및 4병렬의 경우 마치 bipolar PWM처럼 동작하여 스위칭 리플의 저감 효과가 기대한 결과보다 낮음을 확인하였다. 따라서 스위칭 리플의 저감 측면만을 고려한다면 전력보상장치의 병렬 시스템은 180° 캐리어가 포함된 4병렬 시스템보다 120° 캐리어를 사용하는 3병렬 시스템이 유리한 것을 확인하였다.

1. 서론

국내 교류전기철도 시스템은 3상 전압 154kV를 수전하고 스코트 변압기를 통해 2개의 55kV 단상 전압으로 변환하여 철도차량 부하에 공급한다. 이러한 방식은 철도 차량의 운행이 없을 경우에는 단상 부하가 동일하기 때문에 3상 계통 측의 전력 또한 평형인 상태가 유지되지만, 차량의 노선에 따라 한쪽의 상에서 열차가 운행되면 단상 계통 사이에 극심한 불평형이 발생하고, 3상 시스템에도 영향을 미친다. 이와 같이 불평형이 발생하게 되면 3상 기기에 역상 전류가 흘러 전력 계통의 품질이 저하되고, 발전기의 용량감소 및 기계적 진동의 원인이 되며, 회전기기 전반에 영향을 미친다^[1].

교류전기철도용 전력보상장치는 단상 대용량 불평형 부하인 전기철도 시스템에 적용하여 계통의 불평형을 저감 시켜주는 장치이다. 전력보상장치를 대용량 부하인 철도 시스템에 적용하기 위해서는 전력보상장치의 용량을 높이기 위해 전력보상장치를 병렬로 구성하여야 한다. 이러한 병렬 시스템에서는 계통 전류의 스위칭 리플을 저감하기 위해 인터리빙(Interleaving) 기법을 사용할 수 있다. 인터리빙 기법은 병렬 연결된 시스템에서 각 컨버터의 전압 PWM 캐리어의 위상에 차이를 주어 계통에서 전류가 더해질 경우 스위칭 리플을 저감할 수 있는 기법이다^[2].

전력보상장치를 구성하는 단상 3레벨 인버터 시스템에서는

unipolar PWM과 bipolar PWM 두 가지로 PWM의 방식을 나눌 수 있다. unipolar PWM의 경우 a폴과 b폴의 PWM 전압 지령치의 위상이 180° 차이가 나기 때문에 10kHz로 스위칭을 할 경우 20kHz의 스위칭 리플이 발생하고, bipolar에 비해 인버터 출력 전류의 스위칭 리플이 작다는 장점이 있어 대부분의 일반적인 단상 시스템에서는 unipolar PWM을 주로 사용한다. bipolar PWM의 경우에는 인버터의 공통모드 전압에 유리한 특성이 있어 태양광 인버터 시스템에서 주로 사용한다. 본 논문에서는 단상 3레벨 조건에서 unipolar PWM과 bipolar PWM 방식에 따른 전력보상장치 병렬 시스템에서의 인터리빙 효과를 비교하고 unipolar PWM 조건에서 전력보상장치의 3병렬 시스템과 4병렬 시스템의 인터리빙 효율을 비교한다.

2. 단상 3레벨 Unipolar, Bipolar PWM

2.1 단상 3레벨 Unipolar, Bipolar PWM 동작

단상 2레벨 인버터의 경우 bipolar PWM 방식은 a폴 상단 스위치와 b폴 하단 스위치가 동시에 동작한다. 단상 3레벨 인버터에서 bipolar PWM 방식을 구현하기 위해서는 폴 전압의 상태를 고려하여 a1(a폴 1번 스위치)과 b4(b폴 4번 스위치), a2와 b3, a3과 b2, a4와 b1 스위치를 동시에 동작시켜야 한다.

또한 단상 3레벨의 조건에서 bipolar PWM을 구현하기 위해서는 DC 링크 전압 밸런싱 제어기의 출력이 PWM 전압 지령치에 반영되는 부호를 unipolar PWM과 다르게 적용해야 한다. unipolar PWM의 경우 밸런싱 제어기의 출력이 반영되는 부호는 계통 전압과 컨버터 출력 전류의 부호에 따라 결정되는데, 전압과 전류의 부호가 같을 경우 밸런싱 제어기의 출력은 양의 값으로 더해지며, 부호가 다를 경우 음의 값으로 더해진다. 하지만 a폴과 b폴에 동일한 전압 지령치를 사용하는 bipolar PWM의 경우에는 unipolar PWM과 비교했을 때 b폴의 전압 지령치가 역상으로 반대의 부호를 갖는다. 때문에 b폴의 전압 지령치에 더해지는 밸런싱 제어기의 출력 또한 unipolar PWM을 기준으로 반대의 부호를 인가해 주어야 한다.

그림 1과 그림 2는 각각 unipolar PWM과 bipolar PWM 방식을 사용했을 때의 인버터 출력 전압을 나타낸다. 그림 1을 보면 각각의 전압 지령치를 공급하는 unipolar PWM의 폴 전압이 대칭으로 나오지 않기 때문에, 앞서 서술한 바와 같이 출력 전압이 20kHz로 나타나는 것을 알 수 있으며, 그림 2에서는 bipolar PWM의 폴 전압이 대칭으로 나와 출력 전압이 10kHz로 나타나는 것을 알 수 있다.

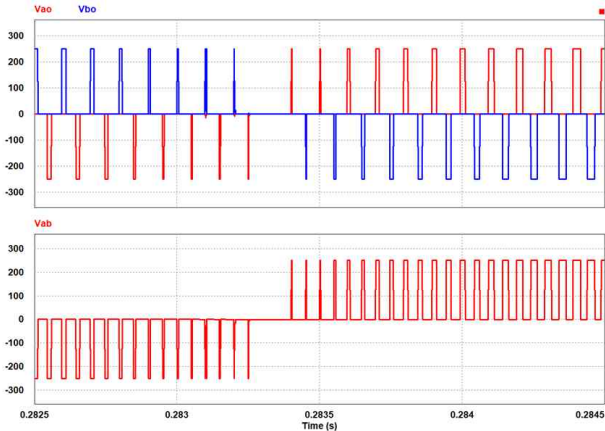


그림 1 Unipolar PWM 인버터 출력 전압
Fig. 1 Inverter output voltage using unipolar PWM

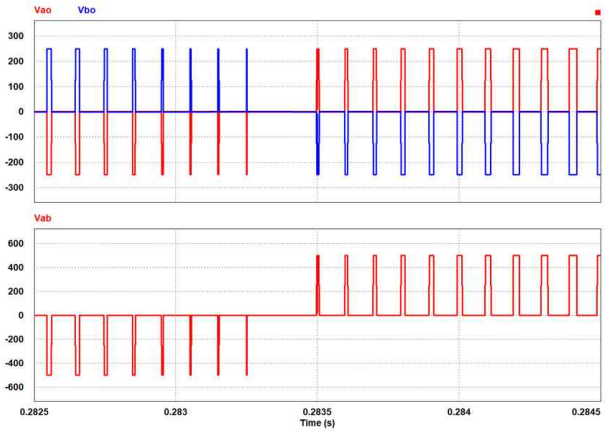


그림 2 Bipolar PWM 인버터 출력 전압
Fig. 2 Inverter output voltage using bipolar PWM

2.2 전력보상장치 2병렬 시스템 PWM 방식 비교

그림 3은 전력보상장치의 2병렬 시스템 구성을 나타낸다. 스크트 변압기를 통해 3상 계통을 입력받아 2개의 단상 계통으로 출력하고 있으며, 2대의 단상 3레벨 백투백 컨버터가 출력단의 변압기를 통해 병렬로 연결되어 있다.

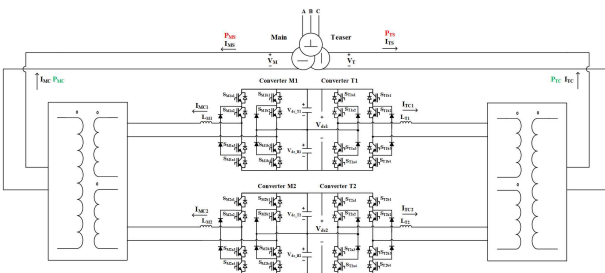


그림 3 전력보상장치 2병렬 시스템
Fig. 3 2-parallel system of power compensator

2.2.1 Unipolar PWM 조건의 2병렬 시스템

그림 4는 전력보상장치의 2병렬 시스템에서 백투백 컨버터 1과 2의 PWM 캐리어가 180° 의 위상차를 가지며, unipolar PWM 방식을 사용했을 때의 백투백 컨버터 출력 전류와 단상 계통 전류를 FFT한 결과이다. unipolar PWM 방식의 경우 각 컨버터 출력 전류에서 20kHz 대역의 스위칭 리플이 크고 계통 전류에서도 마찬가지로 20kHz 대역의 리플이 가장 크며, 각 컨

버터 전류 리플의 크기를 합한 것만큼 나타난다.

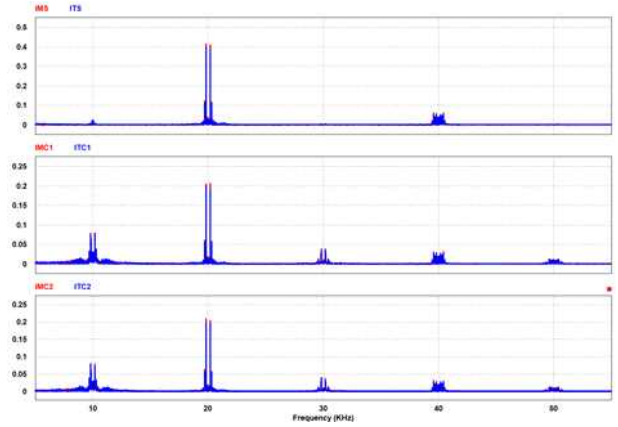


그림 4 Unipolar PWM 전류 FFT
Fig. 4 Current FFT using unipolar PWM

2.2.2 Bipolar PWM 조건의 2병렬 시스템

그림 5는 전력보상장치의 2병렬 시스템에서 백투백 컨버터 1과 2의 PWM 캐리어가 180° 의 위상차를 가지며, bipolar PWM 방식을 사용했을 때의 백투백 컨버터 출력 전류와 단상 계통 전류를 FFT한 결과이다. unipolar PWM과 달리 bipolar PWM의 경우 각 컨버터 출력 전류에서는 10kHz의 스위칭 리플이 나타나며 unipolar PWM 방식에 비해 리플의 크기도 훨씬 크지만 각 컨버터 출력 전류의 리플이 서로 상쇄되어 계통 전류에서는 unipolar와 마찬가지로 20kHz 대역의 리플이 가장 크며, 크기도 동일하다. 이를 통해 unipolar PWM 방식에서 180° 캐리어를 사용한 인터리빙 방식은 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

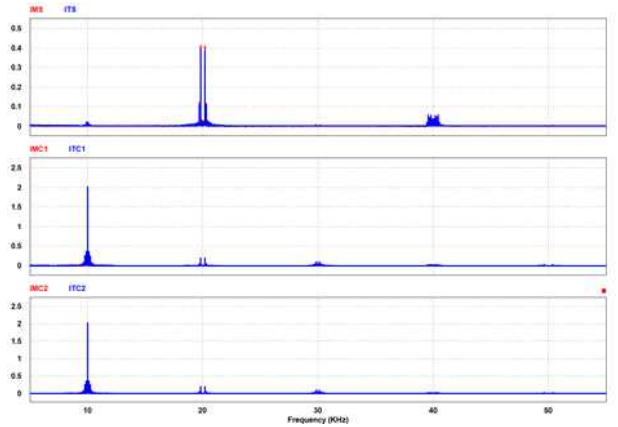


그림 5 Bipolar PWM 전류 FFT
Fig. 5 Current FFT using bipolar PWM

2.3 Unipolar PWM 조건의 3병렬, 4병렬 시스템

그림 6은 120° 위상차를 갖는 PWM 캐리어를 사용한 전력보상장치의 3병렬 시스템 구성을 나타낸다. 2병렬 시스템에서 단상 3레벨 백투백 컨버터 1대가 추가되고, 그로 인해 출력단의 변압기 또한 3권선 변압기에서 4권선 변압기로 변경된 모습을 확인할 수 있다. 그림 7은 전력보상장치의 4병렬 시스템 구성을 나타낸다. 2병렬 시스템에서 단상 3레벨 백투백 컨버터 2대가 추가되고, 출력단의 변압기 또한 5권선 변압기가 연결되어 있으며 각각 90° 의 위상차를 갖는 PWM 캐리어를 사용한다.

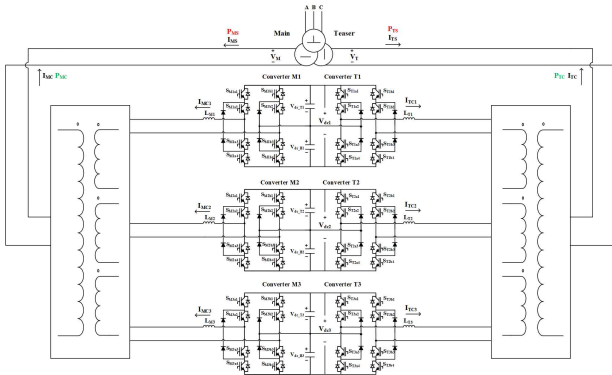


그림 6 전력보상장치 3병렬 시스템
Fig. 6 3-parallel system of power compensator

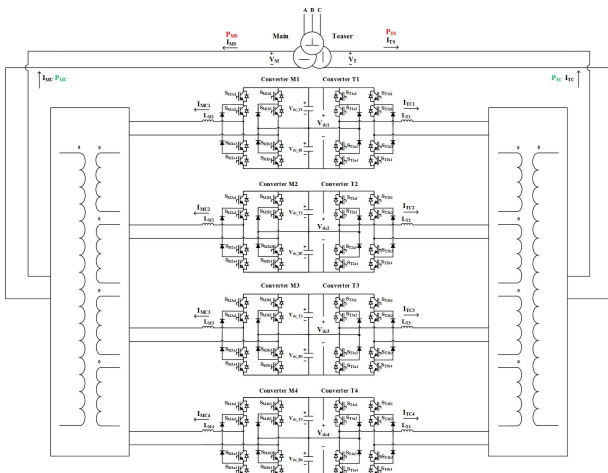


그림 7 전력보상장치 4병렬 시스템
Fig. 7 4-parallel system of power compensator

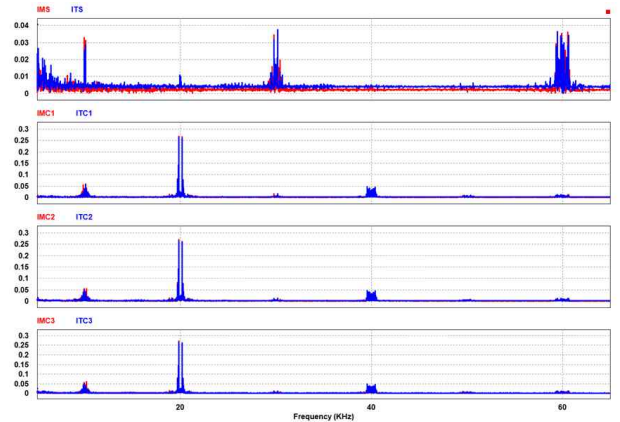


그림 8 3병렬 시스템 전류 FFT
Fig. 8 Current FFT in 3-parallel system

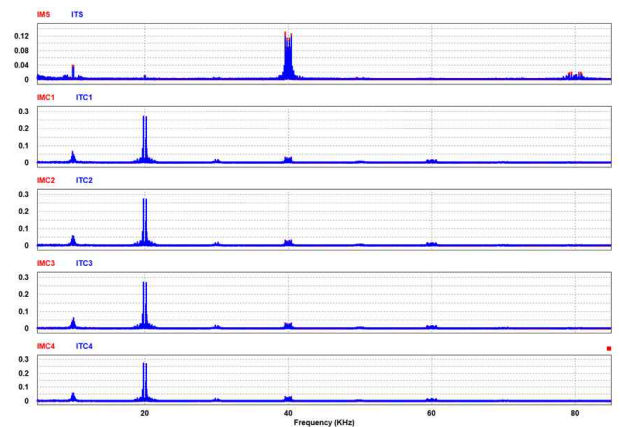


그림 9 4병렬 시스템 전류 FFT
Fig. 9 Current FFT in 4-parallel system

2.3.1 Unipolar PWM 조건의 3병렬 시스템

그림 8은 unipolar PWM을 사용한 전력보상장치의 3병렬 시스템에서 각각의 백투백 컨버터가 120° 위상차를 갖는 캐리어를 사용했을 때의 단상 계통 전류와 각 컨버터 출력 전류를 FFT한 결과이다. 3병렬 시스템의 경우 각 컨버터의 출력 전류에서는 unipolar PWM 방식을 사용하기 때문에 20kHz의 스위칭 리플이 발생하며, 전류의 리플또한 120° 의 위상차를 갖기 때문에 단상 계통 전류에서는 20kHz의 리플이 상쇄되고 60kHz의 리플이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 60kHz의 크기 자체도 약 0.25A인 각 컨버터 출력 전류에 비해 약 0.03A 정도로 굉장히 작은 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 Unipolar PWM 조건의 4병렬 시스템

그림 9는 같은 PWM 방식을 사용한 전력보상장치의 4병렬 시스템에서 각각의 백투백 컨버터가 90° 씩 위상차를 가질 때의 단상 계통 전류와 각 컨버터 출력 전류의 FFT 결과를 보여준다. 앞에서 보았듯이 각 컨버터 출력 전류의 스위칭 리플은 20kHz에서 나타나며 크기 또한 동일하게 나타난다. 하지만 180° 의 캐리어가 포함되기 때문에 계통 전류에서는 80kHz가 아닌 40kHz의 리플이 나타나고 있으며, 크기 또한 약 0.12A로 3병렬 시스템에 비해 스위칭 리플의 감소폭이 적은 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 단상 3레벨 조건에서 unipolar PWM과 bipolar PWM 방식에 따른 전력보상장치 병렬 시스템의 인터리빙 효과를 비교하였으며, unipolar PWM 조건에서 전력보상장치의 3병렬 및 4병렬 시스템의 인터리빙 효과에 대해 비교하였다. 이를 통해 unipolar PWM 방식을 사용하는 조건에서 180° 위상차를 갖는 캐리어가 포함되는 인터리빙의 효과가 다른 위상차를 갖는 인터리빙에 비해 떨어지는 것을 확인하였다. 따라서 스위칭 리플을 저감하는 인터리빙의 효율만을 고려한다면 전력보상장치의 4병렬 시스템보다 3병렬 시스템이 더 유리한 것을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 김정철 “급전계통 해석과 한국철도전기의 이해”, 기다리, 2018.08
- [2] J. Shen, J. A. Tafvig, and A. D. Mansell, “Analytical solution to harmonic Characteristics of traction PWM converters,” IEEE Proceedings on Electronic Power Applications, vol. 144, no. 2, pp. 158-168, 1997.