

PWM 인버터의 고조파 감소와 출력특성 개선

최영환, 김남욱, 현동석  
한양대학교

Design of PWM Inverter for Improving Output and Reducing Harmonics

Chio.Y.H, Kim N.W, Hyun D.S  
HanYang University

**ABSTRACT** 본 논문에서는 SPWM인버터의 출력파형을 개선하고 고조파 성분을 저감시키기 위한 방법으로 스위칭 기법과 LC필터를 제안한다. 스위칭 기법은 일정 고조파 이하를 제거할수 있으나 스위칭 손실을 수반하므로 고차 고조파를 제거하기에는 제약이 많은 따른다. LC필터는 고조파 성분들을 제거할 수 있으나 출력파형의 왜곡을 초래한다. 본 연구에서는 스위칭 기법으로 기본 주파수 근처의 고조파를 제거하고 LC필터를 이용하여 나머지 고조파 성분을 제거하는 방법을 시뮬레이션을 통하여 검토하여 보았다. LC필터의 출력파형 왜곡을 보상하기 위하여 필터에 저항을 직렬 연결하였다.

1. 서 론

출력 전압과 주파수를 동시에 제어할 수 있으며 고조파 영향을 저감시킬 수 있는 장점이 있는 PWM 인버터는 고성능의 전동기구동 등 많은 분야에 활용되고 있다. 그러나 인버터의 출력 파형에서는 기본파 성분 외에 고조파 성분이 포함되어 있어 근접한 통신 계통, 제어 계통 등 약전류 신호선에 전자 유도 장애를 일으키거나 각종 계전기들의 오동작, 전동기 소음 및 토크 맥동 등의 원인이 되고 있다. PWM 제어 방식에서 인버터의 스위칭 주파수를 높이면 저차 고조파 성분이 감소되고, 가청소음이 해소되는 등의 여러 가지 이점이 있다. 그러나 스위칭 주파수가 높아지면 스위칭 손실이 증가하여 전력 변화 효율이 나빠진다. 그러므로 스위칭 주파수는 한정된 범위로 고정하되 출력 파형이 근사 정현파가 되면서 특정 고조파 성분을 제거할 수 있는 고조파 해석 기법에 대한 많은 연구가 이루어 졌다. 실제 대부분의 PWM 인버터의 DC링크 전압은 교류 전원에서 정류된 직류 전압을 사용하므로 맥동이 생기게 되며, 부하 전류의 증가에 따라 맥동분도 더욱 커지게 된다. 이것을 해결하기 위해서 인버터의 출력단에 LC필터를 설치하여 고조파를 저감시키는 방법이 있으나 출력파형을 왜곡시키고 크기 및 비용 증가 등의 단점이 발생하게 된다.

본 논문에서는 저차 고조파 성분을 감소하기 위하여 스위칭 기법을 사용하고, 고차 고조파 성분은 LC필터를

사용하는 방법을 제안한다. 먼저 스위칭에 따라 저차 고조파의 감소 효과를 확인하고 적절한 한계점을 결정한다. 그리고 한계점 이후의 고조파 성분을 제거하기 위하여 적용 가능한 LC필터를 출력단에 연결한다. 출력파형의 왜곡을 보상하기 위하여 필터와 직렬로 저항을 연결하여 그 효율을 제시한 후, PSIM을 이용하여 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 기법에 대한 타당성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 스위칭 기법

PWM 인버터에서 고조파 성분은 출력전압의 매 반주기마다 여러 개의 펄스를 사용함으로써 감소시킬 수 있다. SPWM(sinusoidal pulse-width modulation)는 각 펄스의 폭은 동일 펄스의 중앙에서 평가되는 정현파의 크기에 비례해서 변한다. 게이트 신호는 정현기준 신호와 주파수  $f_c$ 의 삼각반송파를 비교함으로써 생기게 된다.

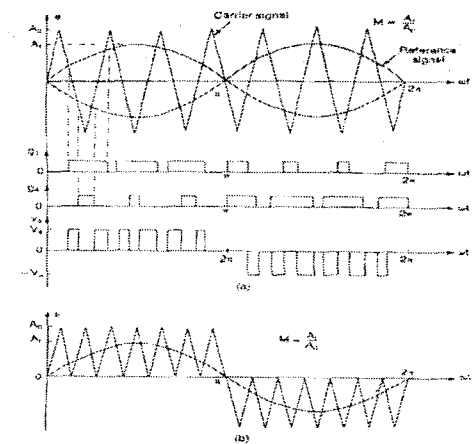


그림 1. SPWM(sinusoidal pulse-width modulation)

기준 신호의 주파수  $f_c$ 은 인버터의 출력주파수  $f_o$ 를 결정하며, 이것의 피크크기  $A_r$ 은 변조지수  $M$ 과 실효출력 전압  $V_o$ 를 제어한다. 반주기당 펄스의 수는 반송주파수에

의존하며 동일 압의 두 개의 트랜지스터가 동시에 도통할 수 없다는 제약하에서, 순시출력전압을 그림 1(a)에 나타낸다. 그림 1(b)에서와 같이 단일 방향 삼각 반송파를 사용하여 동일한 게이트 신호를 얻을 수 있다. 변조지수  $M$ 을 0부터 1까지 가변함으로써 실효출력전압을 0부터  $V_s$ 까지 가변할 수 있다. 각 펄스의 영역이 게이트 신호상의 오프주기의 인접 중심점간의 정현파하에서의 영역과 근사적으로 대응한다는 것을 관측할 수 있다.  $\delta_m$ 이  $m$ 번째 펄스의 폭이라면, 식 (1)은 실효출력전압을 구하기 위해 다음 식과 같이 수정된다.

$$V_o = V_s \left( \sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

출력전압의 Fourier계수는 다음과 같다.

$$A_n = \sum_{m=1}^p \frac{2V_s}{n\pi} [\sin n(a_m + \delta_m) - \sin na_m] \quad (2)$$

$$B_n = \sum_{m=1}^p \frac{2V_s}{n\pi} [\cos na_m - \cos n(a_m + \delta_m)] \quad (3)$$

이러한 변조의 형태는  $2p-1$  보다 작거나 같은 모든 고조파를 제거한다. 예를 들어,  $p=5$ 에 대해서 최저차 고조파는 9차가 된다.

## 2.2 LC필터

인버터 출력 측의 파형은 기본파 성분 외에도 고조파 성분을 포함한다. 그러므로 출력을 부하에 전달하기 전에 필터에 통과시켜 고조파 성분을 감소시킬 필요가 있다. 일반적으로 고조파 왜곡 Factor 감소는 5%가 가장 적당하므로 이에 주안 하여 필터를 설계하였다. 기존에 고안된 대부분의 필터는 LC 필터를 적절히 변형한 것이기에, 이번 논문에서는 널리 사용되는 간단한 LC 필터를 활용하였다. 본 논문에서 제안한 고조파 감소 방법은 기본파 부근의 저차 고조파는 적절한 스위칭 기법으로 감소시키고, 스위칭 기법의 범위를 넘어선 고차 고조파 성분은 LC 필터를 이용하여 감소시키는 것이다.

필터의 입력 전압에 대한 출력 전압의 비를 비교해 보면,

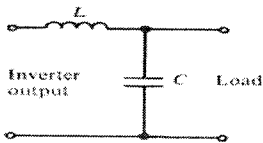


그림 2. LC filter

$$\frac{1/\omega C}{\omega L - 1/\omega C} = \frac{1}{\omega^2 LC - 1} \quad (4)$$

그러므로 저차 고조파에서 보다 고차 고조파에서 상당

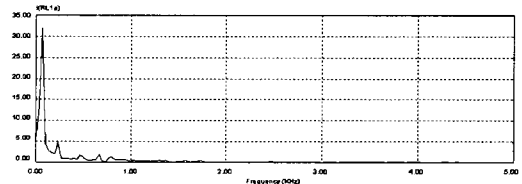
한 감소를 보인다. 그리고 다음 식을 적용하여 LC 필터의 차단 주파수를 설정하여 스위칭 기법의 범위를 넘어선 고차 고조파를 감소시킨다.

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (5)$$

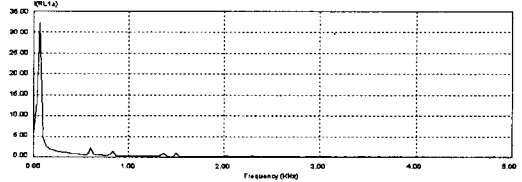
부하측 리플 전압의 더 많은 감쇄를 위해 LC필터들을 직렬로 연결하기도 하지만 무효손실 측면에서 본다면 비효율적이므로 하나의 LC 필터로 고조파 성분을 감소시키고, 저항을 부하에 직렬로 연결하여 출력파형의 왜곡을 보상함으로써 출력 측 특성을 개선하였다.

## 2.3 시뮬레이션 및 고찰

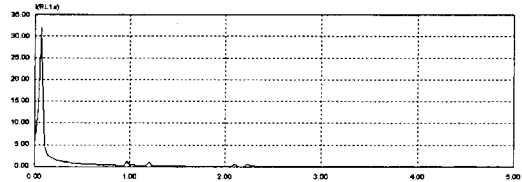
시뮬레이션에서는 Y결선 부하를 사용하였으며, 전력전자 시뮬레이션용 소프트웨어인 PSIM을 사용하여 출력파형의 왜곡 정도를 비교하고 주파수 분석을 통하여 고조파 감소의 시뮬레이션 결과를 보인다. 먼저 필터를 달기 전에 인버터의 저차 고조파를 감소시키기 위해 스위칭 손실을 고려하여 최적의 스위칭 주파수를 설정하였다.



(a)  $p = 3$ , 스위칭 주파수 = 360 Hz



(b)  $p = 6$ , 스위칭 주파수 = 720 Hz



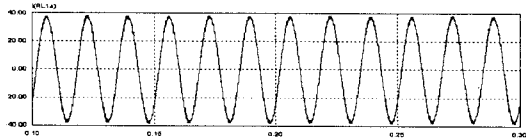
(c)  $p = 9$ , 스위칭 주파수 = 1080 Hz

그림3. 스위칭 주파수에 따른 FFT 파형

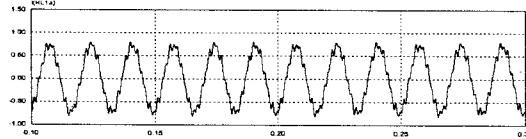
위의 비교 그래프를 통해서 알 수 있듯이, 스위칭 주파수를 높임으로써 2P-1차 미만의 저차 고조파는 감소됨을 알 수 있다. 그림 3.(a)를 예를 들어 설명하면, 5차

고조파 미만의 고조파 성분을 제거하기 위해  $2p-1=5$  가 되어야하므로 Reference신호 60Hz의 반주기에 Carrier 신호의 주기가 3번 반복되어야 한다. 즉 스위칭 주파수는 360Hz가 되는 것이다. 이것을 일반화해서  $p=n$ 일 때의 주파수를 구해 보면, 스위칭 주파수는  $60 \cdot 2n$ [Hz]가 된다. 하지만 여기서 주의해야 할 점은 고조파 제거를 위해 스위칭 주파수를 많이 높이면 스위칭 손실이 증가하므로 적절한 스위칭 주파수의 설정이 필요하다는 것이다.

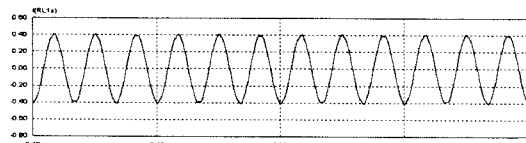
LC필터 설치 후에 출력파형이 일그러지는 현상이 생기게 된다. 이를 개선하기 위해서 부하에 저항을 직렬로 연결하였다.



(a) LC 필터 설치 전 출력 전류 파형



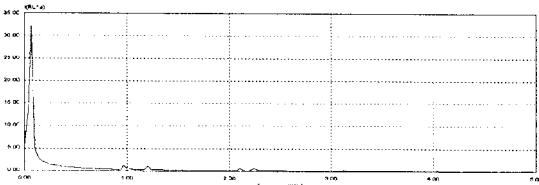
(b) LC 필터 설치 후 출력 전류 파형



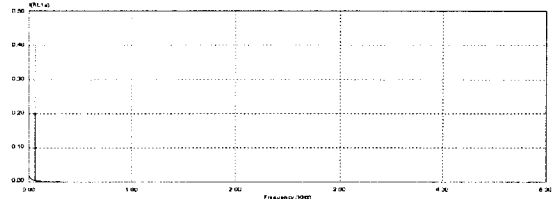
(c) 저항 연결 후 출력 전류 파형

그림4. 출력 파형 비교

위의 그래프에서 알 수 있듯이, 필터 설치 후 파형이 일그러짐을 보이는데, 시뮬레이션 결과에 의하면, 저항 값을 증가시키기에 따라 파형의 개선은 뚜렷해지지만, 어떠한 임계 저항 값을 초과하면 다시 파형이 찌그러짐을 보인다. 그러므로 저항에 의한 손실과 파형의 개선을 절충할 수 있는 부하측 저항과 동일한 저항값을 사용하였다.



(a) LC필터 설치 전 FFT 파형



(b) 개선된 LC필터 설치 후 FFT파형

그림5. FFT파형 비교

필터 설치 전후의 그래프를 비교해보면, 필터를 연결하였을 때 고조파가 완전히 제거된 것을 확인할 수 있다. 그리고 기본파 성분의 리플 전압도 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 스위칭 기법을 이용하여 저차 고조파 성분을 제거하고, LC필터를 연결하여 고차 고조파를 제거하는 방법을 제시하였다. 스위칭 기법에서는  $p$ 값에 따라 제거되는 고조파의 범위가 결정된다. LC필터에서  $L$ ,  $C$  값에 따라 차단 주파수를 결정할 수 있다. 부하 시스템에 따라 이 값들을 적절히 조절하여 인버터를 설계할 수 있다. LC필터 연결 시 초래되는 출력파형 왜곡은 저항을 직렬 연결하여 해결하였다. 그런데 이 저항에 의하여 전압강하가 발생되며, 특히 이 저항의 손실로 인하여 시스템의 효율이 상당히 감소되는 문제가 발생한다. 이 문제에 대해서는 가상저항법 등을 사용하여 추후에 연구를 진행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1]G.J.Choi, "Method For Damping Resonant Voltages on the Output LC Filter of PWM Inverter", 전력전자학술대회논문집, 2004. 7
- [2]Giuseppe S. Buja, "Optimum Output Waveforms in PWM Inverters", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 16, No.6, 1980. 11
- [3]서영석, "DC입력 전압에 대한 PWM인버터의 일반적인 고조파 적응제어에 관한 연구", 학위논문(석사), 1987
- [4]Ned Mohan, "Power Electronics", JOHN WILEY & SONS, INC., Trird Edition, 2003.
- [5]D.Grahame Holmes, "PWM for Power Converters", JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.