

단상 PWM 컨버터의 전원측 필터의 해석 및 설계

김 홍 성* 이 승 요* 김 한 성* 유 권 종** 송 진 수**

진국대학교 전기공학과 *

한국에너지기술연구소 **

Analysis and Design of Filter at AC Source of Single Phase PWM Converter

Hong Sung Kim Seung Yo Lee Han Sung Kim Gwon Jong Yu Jin Soo Song

Dept. of Electrical Eng. Kon-Kuk Univ.* Korea Institute of Energy Research**

Abstracts

This paper deals with the static characteristics of filters at the AC source in single phase PWM converter using hysteresis current control method. The filters are needed to reduce the current harmonics. In general, there are two kinds of filters which can be used for current controlled PWM converter: One is the low pass filter, the other is the resonant filter for a frequency. This paper designs these filters by analysing the characteristics. And these filters are compared through performance index such as harmonic reduction factor and the value of components which make up filters.

1. 서 론

일반적인 AC/DC변환장치로 사용되는 다이오드정류기에 비해 역을 및 전류고조파 측면에서 유리한 동시에 양방향운전이 가능한 단상 PWM컨버터는 중, 소용량의 UPS, 계통연계형 태양광발전시스템, 직류 전동기구동 등에 많이 사용되고 있다. 이런 여러가지 용도 가운데 모터구동용으로 이용되는 경우를 제외하고 UPS나 태양광발전시스템 등에 이용될 경우는 출력전압의 왜형이 거의 없는 정현파전압을 요구한다.

특히 계통연계형 태양광발전시스템의 경우에는 컨버터의 출력특성이 시스템의 성능을 좌우하는 요소가 된다. 이는 컨버터에 의하여 발생하는 고조파성분의 전원측으로의 유입정도를 가리키는데 이에 대한 대책으로 고주파스위칭을 들 수 있으나 이는 스위칭손실을 증가시키며 커패시터의 수명을 단축시킨다. 또한 스위칭주파수의 한계가 주어지므로 전원측에 수동필터를 부가적으로 이용할 필요성이 있다. [1] 일반적으로 사용될 수 있는 필터로는 특정차수 이하의 주파수 성분만 통과 시키는 저역통과 필터와 선택적으로 고조파의 제거가 가능한 단일동조필터를 들 수 있다.

본 연구에서는 두가지 필터에 대한 정특성해석을 통하여 히스테리시스 전류제거기법을 이용하여 전전과 연계운전을 하는 태양광 발전시스템에서의 단상 PWM컨버터의 전원측필터를 설계하고자 한다.

2. 교류전원측 필터

그림1의 PWM 컨버터에서 필터는 컨버터 입력전류 i_s 의 구성성분중 고조파분의 전원측으로의 유입을 억제하기 위하여 필요하다. 이 시스템에서 사용될 수 있는 필터는 특정차수 이하의 주파수 성분만 통과 시키는 저역통과 필터와 선택적으로 고조파의 제거가 가능한 단일동조필터를 들 수 있다.

(1) 동조필터

동조필터는 특정주파수성분에 대하여 필터링이 가능하다. 동조필터는 그림3과 같이 구성되고, 전달함수는 다음과 같다. 다음식에서 L 은 L_s 및 필터인덕터 L_f 의 합이다.

$$G(S) = \frac{\frac{R_L}{L} S^2 + \frac{R_L}{L} S + \frac{1}{LC_f}}{S^2 + \frac{R_s + R_L}{L} S + \frac{1}{LC_f}} \quad (1)$$

(2) 저역통과필터

저역통과필터는 그림2와 같이 인덕터와 커패시터로 구성되는데 이에 대한 전달함수는 다음과 같다.

$$G(S) = \frac{\frac{R_L}{L} S + \frac{1}{LC_f}}{S^2 + \frac{R_s + R_L}{L} S + \frac{1}{LC_f}} \quad (2)$$

여기서 L 은 L_s 및 필터인덕터 L_f 의 합이다.

3. 히스테리시스제거기의 스위칭특성 및 입력전류의 고조파특성 [2]

히스테리시스제거기의 스위칭주파수는 일정한 직류전압, 이상적인 스위칭, 교류측인덕터의 저항성분에 의한 전압강하의 무시를 가정하면 다음과 같이 평균주파수를 중심으로 전원의 2배주파수의 맥동주파수로 구성된다.

$$f_{sw} = \frac{nf}{\Delta X V_c} [V_c^2 - V_m^2 + \frac{X^2 I_m^2}{2} + V_m^2 + X^2 I_m^2 \cos 2(\theta - \phi)] \quad (3)$$

(V_c : 직류단전압 Δ : 밴드폭 X : ωL)

이러한 스위칭특성을 갖는 히스테리시스전류제거기를 사용할 경우 전전전류는 기본파성분과 평균주파수를 중심으로한 맥동주파수의 대역폭성분으로 구성되는데, 이때 주파수 변조이론중 카슨의 법칙에 의하여 맥동주파수의 대역폭성분이 갖는 전력의 98%를 갖는 주파수 대역폭을 구할 수 있는데 이는 다음과 같다.

$$BW = 2(\delta + f_m) \quad (4)$$

(δ : 주파수 편차 f_m : 맥동 주파수)

$$BW = \left(\frac{\pi V_m^2}{2a X V_d} + 4 \right) f \quad (5)$$

4. 필터의 해석 및 설계

필터의 설계대상은 평균스위칭주파수 15[kHz]를 중심으로 카슨의 법칙에 의해 구해진 양쪽 주파수 축파대가 약 1224[kHz]로 운전되는 히스테리시스 전류제어를 행하는 PWM 컨버터를 대상으로 하였다. 전원전압 V_s 100[V], 컨버터 입력전류 i_s 6[A], 전원임피던스 R_s , L_s 는 각각 0.6[Ω], 0.22[mH]이다.

(1) 동조필터

동조필터의 인덕터와 커패시터는 식(6)의 공진주파수를 결정하는 정수로서 여기서 공진주파수는 평균스위칭주파수로 결정한다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_f}} \quad (6)$$

공진 주파수를 결정하는 필터인덕턴스 및 커패시턴스는 일정한 공진주파수에 대하여 1사분면에서 쌍곡선 함수를 그리는데 이때 곡선의 Knee부분의 값을 선택하는것이 합리적이다.

그림4의 주파수 및 공진주파수의 비 (f_o)에 대한 필터임피던스와 전원임피던스의 크기의 비 ($|Z_o|$)의 곡선은 댐퍼저항 R_f 선정의 기준이 된다. 예를 들면 설계조건에서 카슨의 법칙에 의하여 알수 있는 왼쪽축파대 주파수 성분의 70[%]이상을 제거하고자 한다면 R_f 는 6[Ω]이하로 선정되어야 한다.

$$f_o = \frac{f}{f_r} \quad (7)$$

$$|Z_o| = \frac{|Z_f|}{|Z_s|} \quad (8)$$

댐퍼저항 R_f 는 전원 인덕터와 필터 인덕터의 합 ($L_s + L_f$)와 필터 커패시터 C_f 의 공진을 제한하는 역할을 하는데 R_f 가 커질수록 직렬 공진 주파수의 선택도가 낮아지면서 저역통과 필터특성이 가까워짐을 볼 수 있다. 그러므로 저항 R_f 는 주파수선택도 및 병렬공진현상에 영향을 미치는 요소로서 필터특성에 큰영향을 미친다. 그림5는 R_f 의 변화에 따른 성능지수 (S_d)의 곡선이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 R_f 가 낮을수록 좋은특성을 갖는다.

$$S_d = \frac{i_s \text{의 THD}}{i_{s1} \text{의 THD}} \quad (9)$$

(2) 저역통과 필터

저역통과필터는 그림2와 같이 인덕턴스와 커패시턴스가 병렬로 연결되어있는 형태로서 컨버터 입력전류(i_s)와 전원전압이 동상으로 제어된다면 전원전류(i_{in})는 그림 6의 실선과 같다. 저역통과 필터가 원활한 필터링을 하기 위해서는 스위칭주파수에 비하여 낮은 차단 주파수를 갖도록 설계되어야 한다. 이때 인덕턴스 및 커패시턴스의 선정이 적절하지 않으면 동조필터와 달리 역을 큰 영향을 미치게 된다. 이런 역을저하는 그림6의 점선과 같이 필터에 흐르는 기본파 성분을 미리 계산해서 전압과 동상인 전류 기준 신호와 더해 줌으로써 해결될 수 있으나 전류제어용 인덕터 및 스위칭소자의 전류용량을 증가 시킨다. 그래서 저역필터설계시 차단 주파수 및 역을특성을 고려 하여야 한다. 본 논문에서는 병렬공진 주파수를 이용하여 커패시턴스 및 인덕턴스를 결정하고 필터저항을 변화시켜 역을 및 차단주파수의 변화특성을 해석한후 이를통하

여 필터의 인덕턴스 및 커패시턴스를 결정하였다. 그림7은 병렬공진주파수가 500[Hz]일때의 필터인덕터, 커패시터에 대하여 저항의 변화에 따른 기본파 역을을 나타낸 그림이다. 커패시턴스가 작을수록, 저항이 클수록 역을이 높아짐을 알 수 있다. 그림8은 같은 조건에서의 차단주파수를 나타낸 것으로 저항이 영일 경우는 거의 변화가 없으나 댐퍼용 필터저항이 커질수록 변화율이 커지고 역을을 알 수 있다. 역을 0.95를 기준으로 한다면 그림7을 통하여 필터 커패시터는 50[μF]이하로 선정되어야 한다. 그림9는 저역필터의 성능지수곡선으로서 공진주파수 500, 700, 900[Hz]에 대하여 역을 0.95를 경계로하여 선정된 값에 대하여 시뮬레이션을 통하여 고찰한 것이다. 그림9에서 R_f 가 3[Ω]이하에서는 차단주파수가 낮아짐에도 불구하고 성능지수가 높아지지않거나 하락하는 경우를 보게되는데 이는 병렬공진주파수대 전류성분의 공진으로 인한 증폭으로 인해 이러한 현상이 발생한다.

5. 검토 및 결론

지금까지 시뮬레이션을 통한 필터의 해석을 통하여 필터를 설계하였다. 이러한과정에 의해 설계된 필터에 대하여 필터링 전과 후의 시간평면에서의 전류파형에 대한 FFT해석을 하였고, 주파수 스펙트럼을 그림10, 11에 나타내었다. 그림10은 필터링 전의 주파수 스펙트럼으로서 중심주파수는 15[kHz]이고, 양쪽으로 12[kHz] 정도의 축파대가 있음을 알 수 있다. 그림11의 (a), (b)는 그림5, 9의 성능지수곡선에서 각각 a, b점의 주파수 스펙트럼이다. 그림12에서는 필터링 전의 스펙트럼에서 볼 수 없었던 성분이 나타나는데 이 성분이 필터와 전원임피던스간의 병렬공진에 의한 공진주파수 성분에 해당한다.

본 논문에서는 단일동조필터 및 저역필터를 대상으로 전류 THD에 대한 정특성 해석을 하였다. 동조필터는 중심스위칭 주파수에 맞추어 공진주파수를 결정하고, 댐퍼저항은 전원임피던스와 필터 임피던스의 비에 의하여 결정하였다. 댐퍼저항이 작을수록 고조파 제거율이 높았다. 그러나 이러한 댐퍼저항은 시스템의 과도상태에서 시스템 응답에 영향을 미치는 요소로, 동특성해석을 아울러 향후 정확하게 설계 될 수 있다. 저역필터는 차단주파수를 낮춤으로써 그림5에서 성능지수가 가장높은 12일때, 약 84[%] 정도의 필터링 능력을 지닌 동조필터에 비하여 매우 좋은 필터링 효과를 나타내었다. 그러나 인덕턴스 및 커패시턴스가 상승하여 가격면에서 불리함을 보였다. 그러므로 저역필터는 필터링 효과 및 가격에 대한 비중에 따라 설계될 수 있다. 그림5와 9에서 성능지수가 10 정도인 점을 비교해보면 동조필터의 경우는 R_f 가 0.1인 점에 해당하며 저역필터의 경우는 공진주파수 900[Hz], R_f 6.9로서 이때 각각 차단주파수는 1.7[kHz], 2[kHz]에 해당한다. 이때 저역필터의 인덕턴스 및 커패시턴스는 동조필터에 비하여 커지지만 고조파 제거율은 거의 비슷한 특성을 보인다. 그러므로 히스테리시스제어를 이용하여 고속스위칭을 하는 컨버터와 같이 특정고차주파수 성분만이 전류THD에 영향을 미치는 경우는 동조필터를 이용함이 가격면에서 유리함을 알 수 있다. 또한 중심주파수를 중심으로한 축파대를 줄인다면 보다 나은 효과를 보일 것이다. 지금까지의 결과는 고조파필터링에 대한 정특성해석만을 다루었으므로 추후 부하변동이나 양방향운전시에 발생하는 과도상태에 대한 동특성도 비교 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 김윤호, 윤병도, 오인희, 송치영, "고속전철용 GTO컨버터의 변조 방식과 고조파 특성" 1993 전력전자 연구발표회
- [2] 정승기, "전류 제어형 전압형 컨버터에서의 입력 전류 주파수 특성" 1991 춘계 전력전자 학술대회 논문집.
- [3] Hyo-Sung Kim, Tae-Woong Kim, Jae-Ho Choi, "Optimal Input Filter Design of 3-Phase Thyristor Converter with Simulation Method" 1992 Proceedings of ISPE

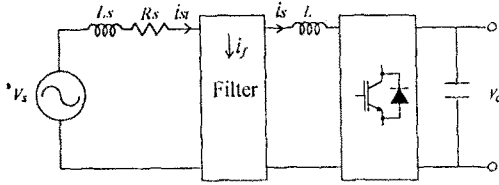


그림 1. 단상PWM 컨버터

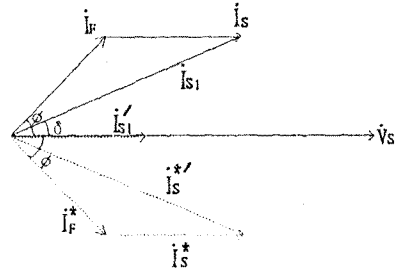


그림 6. 벡터도

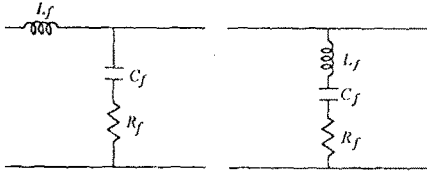


그림 2. 저역필터

그림 3. 동조필터

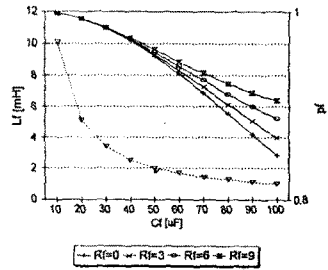


그림 7. 임피던스곡선

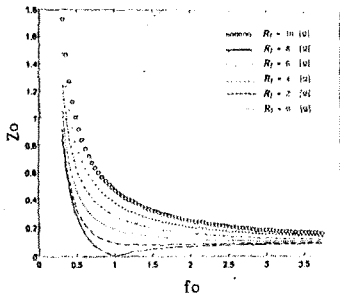


그림 4. 주파수에 대한 임피던스곡선

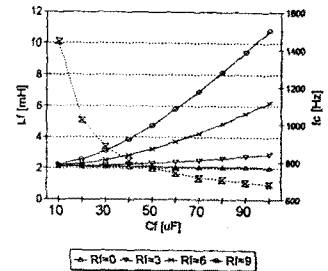


그림 8. 차단주파수의 변화 곡선

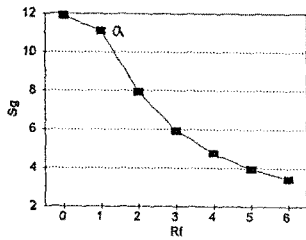


그림 5. \$R_f\$에 대한 성능지수 (\$S_g\$)의 곡선

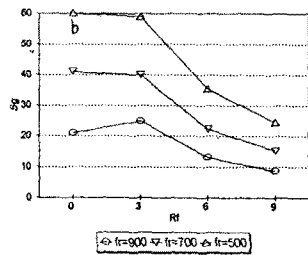


그림 9. \$R_f\$에 대한 성능지수 (\$S_g\$)의 곡선

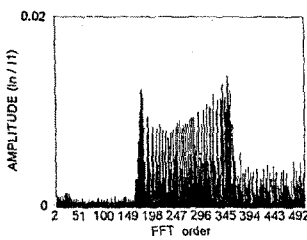
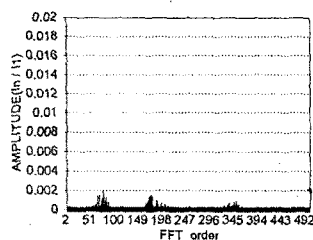
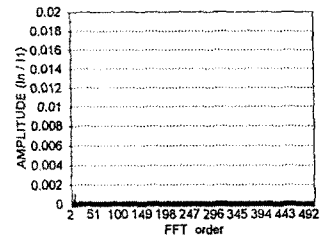


그림 10. 필터링전의 스펙트럼



(a) 동조필터



(b) 저역필터

그림 11. 필터링후의 스펙트럼