

태양광 발전용 마이크로 인버터의 출력 Trap-CL 필터 설계

노용수*, 지용혁*, 김준구*, 이태원**, 원충연*
 성균관대학교* 삼성전기(주)**

Design of the output Trap-CL filter for photovoltaic micro-inverter

Yong-Su Noh*, Young-Hyok Ji*, Jun-Gu Kim*, Tae-Won Lee**, and Chung-Yuen Won*
 Sungkyunkwan University* Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.**

ABSTRACT

태양광 발전용 마이크로 인버터는 PV 모듈에 직접 설치되기 때문에 크기, 무게 등이 중요한 설계 요소다. 따라서 출력 필터 설계 시 전력 품질 뿐만 아니라 필터에 사용되는 수동 소자의 크기 또한 고려해야 한다. 본 논문에서는 마이크로 인버터용 출력 필터로서 Trap-CL 구조를 분석하고, 필터의 소형화를 고려한 설계 기법을 제안한다. 설계 된 Trap-CL 필터의 특성을 단상 플라이백 인버터에 적용하여 확인하였으며, 기존 플라이백 인버터에 사용되던 CL 필터와의 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 태양광 발전용 인버터는 부분 음영에 의해 발생하는 효율 저하를 없애기 위해 각 모듈마다 인버터를 설치하는 AC 모듈의 형태로 기술 개발이 진행되고 있다. 각 PV 모듈마다 마이크로 인버터가 설치됨에 따라 인버터의 출력 전력 품질 뿐만 아니라 효율, 크기 또한 중요한 설계 요소가 된다. 따라서 인버터의 출력 필터를 설계할 때는 계통 규격을 준수하는 범위 내에서 가능한 작은 용량의 수동 소자를 사용하여 필터에서의 전력 손실과 크기를 줄이도록 설계되어야 한다.

PWM 기법을 사용할 경우 고조파의 대부분은 스위칭 주파수의 배수에서 발생하고, 그 중 스위칭 주파수 성분이 가장 크게 나타난다. 따라서 수십 kHz의 고주파 스위칭인 경우 Trap 필터를 사용하여 스위칭 주파수 성분을 제거하고 지역 통과 필터를 결합하여 기존의 방식보다 효과적으로 스위칭 고조파를 제거할 수 있다.^[1]

본 논문에서는 제안하는 Trap-CL 필터의 특징을 전달 함수 및 모델링을 통해 분석하고, Trap 주파수 및 필터의 크기 저감을 고려한 설계 기법을 제안하였다.

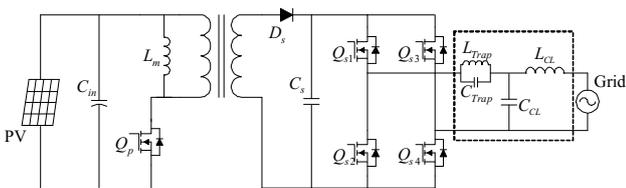


그림 1 Trap-CL 필터를 갖는 단상 플라이백 인버터의 회로도
 Fig. 1 Single phase flyback inverter with Trap-CL filter

2. Trap-CL 필터

2.1 Trap 필터

그림 2는 Trap 필터의 구조와 블록도를 나타낸다. 그림 2의 Trap 필터는 공진형 필터의 한 종류로 LC 공진을 이용하여 특정 주파수에서 높은 임피던스를 갖도록 한 필터이다. 따라서 공진 주파수를 주 스위치의 스위칭 주파수에 맞추어 설계하여 스위칭 주파수 성분을 제거한다.^[1] Trap 필터의 공진 주파수는 식 (1)과 같다.

$$f_{Trap} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Trap}C_{Trap}}} \quad (1)$$

식 (1)로부터 Trap 주파수는 L_{Trap} 과 C_{Trap} 에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

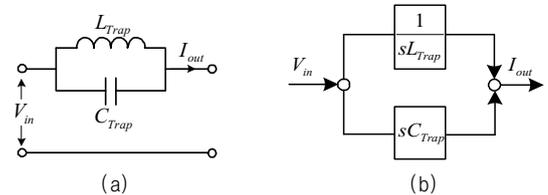


그림 2 Trap 필터의 (a)구조와 (b)블록도
 Fig. 2 (a)Structure and (b)block diagram of Trap filter

2.2 Trap-CL 필터

Trap-CL 필터의 목적은 Trap 필터로 스위칭 고조파 성분을 제거하고 CL 필터를 설계하여 전체 필터 크기를 줄이는데 있다. 그림 1의 단상 플라이백 인버터의 출력은 기본파가 정현파 형태인 전류이므로 필터 앞단에 추가적인 커패시터가 필요하다. 입력 커패시터를 고려하여 Trap 필터와 CL 필터를 결합한 Trap-CL 필터의 블록도는 그림 3과 같고, 이를 이용하여 구한 필터 전달함수는 식 (2)와 같다.

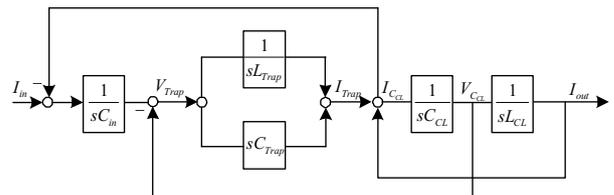


그림 3 제안하는 Trap-CL 필터의 블록도
 Fig. 3 Block diagram of Trap-CL filter

3. 시뮬레이션

표 1 기존 CL 필터와 제안된 Trap-CL 필터의 파라미터
Table 1 Parameters of proposed Trap-CL filter

구분	커패시턴스		인덕턴스	
기존 필터	C_{CL}	410 nF	L_{CL}	2471.3 uH
제안된 필터	C_{in}	150 nF	L_{trap}	506.6 uH
	C_{trap}	20 nF		
	C_{CL}	260 nF	L_{CL}	422.2 uH

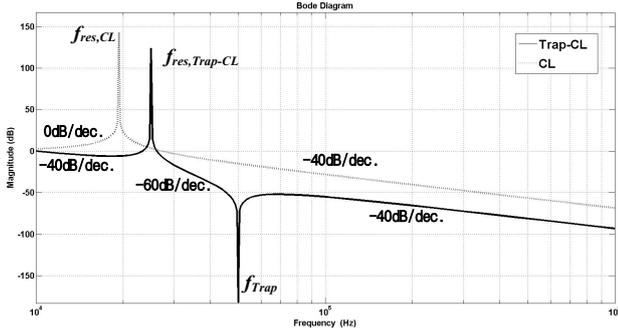


그림 4 기존 CL 필터와 제안하는 Trap-CL 필터의 보드 선도
Fig. 4 Bode diagram of CL filter and Trap-CL filter

$$H_{Trap-CL} = \frac{s^2 L_{Trap} C_{Trap} + 1}{s^4 L_{Trap} L_{CL} (C_{in} C_{Trap} + C_{Trap} C_{CL} + C_{CL} C_{in}) + s^2 (L_{Trap} C_{in} + L_{CL} C_{in} + L_{CL} C_{CL})} \quad (2)$$

식 (2)는 필터 입력 전류에 대한 출력 전류의 전달 함수로 그림 4와 같은 보드선도를 가진다. 인버터 출력 전류의 고조파 감쇄율은 공진점 전후로 각각 -40dB/dec., -60dB/dec.를 나타낸다. Trap 필터에 의하여 스위칭 주파수에서 고조파 성분은 크게 감소하였다가 다시 -40dB/dec.를 나타낸다. 즉, 공진점을 낮게 설계하면 필터의 성능을 높일 수 있다. 하지만 수동 소자의 크기가 증가하기 때문에 설계 시 Trap 주파수뿐만 아니라 적절한 공진 주파수의 설정이 고려되어야 한다.

2.3 Trap-CL 필터의 설계

Trap-CL 필터의 설계법은 다음과 같다. 필터에 의한 기본파의 전압 강하를 고려하여 필터 총 인덕턴스는 베이스 인덕턴스의 5%를 넘지 않도록 해야 하며, 커패시터에 의한 무효 전력을 고려하여 필터 총 커패시턴스는 베이스 커패시턴스의 5%를 넘지 않도록 설정한다.^[2]

$$L_{Trap} + L_{CL} \leq 5\% \times Z_{base} \quad (3)$$

$$C_{in} + C_{CL} \leq 5\% \times C_{base} \quad (4)$$

또한, Trap 필터의 인덕턴스는 필터를 통과하는 기본파 성분의 전압강하를 최소화하는 것 뿐만 아니라 보조 필터로서 최소한의 용량을 가져야 한다. 따라서 식 (5)와 같이 Trap 필터에서의 최대 임피던스를 설정한다.

$$L_{Trap} = \frac{k_{Trap} \times Z_{base}}{\omega_n} \quad (5)$$

여기서 k_{Trap} 은 베이스 인덕턴스에 대한 Trap 필터의 인덕턴스 비율이다. 식 (1), (5)를 통해 Trap 필터의 파라미터 값을 계산할 수 있다.

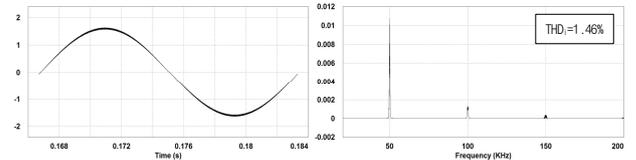
그림 4에서의 공진 주파수 $f_{res, Trap-CL}$ 는 식 (6)과 같고, 고조파 증폭을 최소화하기 위해 식 (7)과 같이 제한한다.^[2]

$$f_{res, Trap-CL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{Trap} C_{in} + L_{CL} C_{in} + L_{CL} C_{CL}}{L_{Trap} L_{CL} (C_{in} C_{Trap} + C_{Trap} C_{CL} + C_{CL} C_{in})}} \quad (6)$$

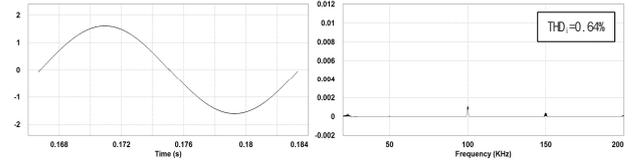
$$10f_n < f_{res, Trap-CL} < 0.5f_{sw} \quad (7)$$

공진 주파수를 설정하고, 입력 전압 리플을 통해 입력 커패시턴스를 구하게 되면 식 (6)을 이용하여 C_{CL} 을 구할 수 있다.

그림 1의 플라이백 인버터의 출력은 250W, 스위칭 주파수는 50kHz로 출력 필터를 설계할 때 파라미터는 표 1과 같다. 기존 CL 필터에 비해 필터 인덕턴스는 약 38%로 감소하였고 그림 5의 시뮬레이션 결과를 통해 THD_i 또한 1.46%에서 0.64%로 약 0.82% 정도 감소하였음을 확인하였다.



(a) CL 필터에서의 출력 전류 파형과 FFT 분석



(b) Trap-CL 필터에서의 출력 전류 파형과 FFT 분석

그림 5 (a)CL 필터와 (b)Trap-CL 필터의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results of (a)CL filter and (b)Trap-CL filter

4. 결론

본 논문에서는 태양광 마이크로 인버터의 출력 필터의 크기를 저감하기 위해 Trap 필터의 특징을 분석하고, 이를 기존의 CL 필터와 결합한 Trap-CL 필터의 설계방법을 제안하였다. 시뮬레이션 분석을 통해 제안된 Trap-CL 필터의 인덕턴스가 기존 출력 필터(CL 필터)에 비해 약 38%로 저감되는 것을 확인하였다. 제안된 Trap-CL 필터는 소자가 추가된다는 단점이 있지만 총 인덕턴스가 감소함에 따라 부피 감소 및 인덕터의 동손 감소를 기대할 수 있다.

이 논문은 (주)삼성전기의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Sozer Y., Torrey D.A., Reva S., "New inverter output filter topology for PWM motor drives", Power Electronics, IEEE Transaction, Vol. 15, pp. 1007-1017, 2000, Nov.
- [2] Liserre M., Blaabjerg, F., Hansen S., "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier", Industry Applications, IEEE Transaction, Vol. 41, pp. 1281-1291, 2005, Sept.