

인버터측 인덕터의 전류 리플을 고려한 계통연계 LCL필터의 최적설계

임상민, 최재호
충북대학교

Optimized LCL filter design of grid connected inverter considering inverter side inductor current ripple

Sangmin Lim, Jaeho Choi
Chungbuk University

ABSTRACT

현재 계통 연계형 인버터에서 필터 크기를 줄이고 동적특성을 개선하며 필터의 성능향상을 하기 위해 LCL필터의 사용이 증가하고 있다. LCL필터를 설계함에 있어 계통측으로 흘러들어가는 전류의 THD를 줄이는 것이 설계의 주된 목적이지만, 인버터측의 인덕터에 흐르는 전류의 최대치를 고려함으로써 필터에서의 전력손실을 줄이고 시스템전체의 효율을 높게 가져갈 수 있다. 본 논문에서는 계통 연계형 인버터의 LCL 필터설계에 있어서 인버터측 인덕터의 전류 리플의 최대치를 분석하고 이를 고려하여 필터설계를 하고 있다. 이 설계를 통해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

1. 서 론

최근 신재생 에너지 발전 시스템은 세계에서 많은 주목을 받고 있다. 신재생 에너지 발전 시스템이 각광 받음으로써 계통 연계형 인버터의 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이러한 계통 연계형 인버터의 출력에는 스위칭 주파수를 기본으로 하는 배수 고조파들이 발생한다. PWM에 의해 기본파에 높은 고조파성분이 많이 포함되어있는데, 이러한 고조파는 계통에 연계되어있는 부하에 오작동, 고장을 발생시키는 원인이 되며 이를 규정에 의해 규제하고 있다.

고조파를 감소시키기 위하여 저역통과 필터를 이용하여 제거해 주어야 한다. 계통 연계형 인버터는 출력단에 LCL 필터를 가지고 계통연계운전이 이루어진다. LCL 필터는 독립운전과 계통연계 상호 전환이 가능하고 동일한 L필터에 비해 더 낮은 용량으로 높은 고조파 감쇄 효과를 구현 할 수 있는 장점이 있다.^[1]

이러한 LCL 필터의 설계는 여러 논문에서 언급하고 있는데, 여러 LCL 필터 설계 논문의 대부분이 계통측 전류의 THD만을 고려하여 필터가 설계 되어진다. 본 논문은 계통측 전류의 THD뿐만 아니라 인버터측 인덕터에서 발생하는 전류를 분석하여 인덕터에서 발생하는 전압강하를 줄이고 인버터와 제어기의 부담을 줄이고 시스템의 효율을 높이는 최적의 LCL 필터를 설계하여 시뮬레이션과 실험으로써 타당성을 검증한다.

2. LCL 필터 설계

2.1 LCL 필터 파라미터 설계

[2]에서 언급한 설계방법은 인버터측 인덕터와 계통측 인덕터를 하나의 인덕터($L_i + L_g = L_T$)로 보고 설계를 진행한 다. 전체 인덕턴스를 먼저 정함으로써 인덕터의 용량 제약조건을 만족시켜 다른 설계방법보다 시행착오를 줄이는 것이 장점이다. 하지만 스위칭 고조파 전류 감쇄율을 선정하여 각각의 인덕턴스를 구할시 수식이 복잡하다는 단점이 있다. 설계의 방법은 다음과 같다.

a. L_T 선정 수식

전류 리플이 최대치가 되는 $T_{on} = T_{off}$ 구간의 식을 L_T 로 정리하여 L_T 의 Voltage drop를 고려하여 식 (1)의 범위내에서 L_T 를 선정한다.

$$\frac{V_{dc}}{8i_{rp\max} \cdot f_{sw}} \leq L_T \leq \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - 4E_m^2}}{I_m \omega} \quad (1)$$

(E_m : 계통 전압의 피크치, $i_{rp\max}$: 전류 리플 최대치, I_m : 계통 전류의 피크치)

b. 인덕터 L_i, L_g 와 커패시터 C_f 의 선정 과정

a 에서 전체 인덕턴스의 값을 선정한 후 스위칭 고조파 전류 감쇄율(σ)과 계통측 인덕터와 필터 커패시터의 비(r)를 이용해 각 인덕터 간의 비율(a)을 구한다.

$$L_T = L_i + L_g, \quad L_i = aL_g \quad (2)$$

(a : 계통 측, 인버터 측 인덕터 간의 비율, L_g : 계통 측 인버터)

$$\sigma = \left| \frac{I'_{L_g}}{I} \right| = \frac{1+a}{a\left(\frac{1}{r}-1\right)-1} \quad (3)$$

(σ : 스위칭 고조파 전류 감쇄율, I'_{L_2} : 인버터측 인덕터의 스위칭 전류, I : 총 인덕터 스위칭 전류)

공진 현상을 피하기 위하여 스위칭 고조파 전류 감쇄율은 적당한 범위에 있어야 한다. 적당한 범위설정을 위해 공진주파수의 식을 σ 로 표현하면 식 (4)과 같다.

$$w_{res}^2 = \frac{\sigma w_{sw}^2}{1 + \sigma} \quad (4)$$

식 (4)을 공진주파수 제약 범위인 $10f_b \leq f_{res} \leq 1/2f_{sw}$ 에 대입하면 식 (5)과 같다.

$$\frac{1 - \eta}{\eta} \leq \sigma \leq \frac{1}{3} \quad (5)$$

(여기서 $\eta = 100 \left(\frac{\omega_f}{\omega_{sw}} \right)^2$)

필터 커패시터의 비와 고조파 전류 감쇄율로 인덕터간의 비를 (a)를 구하여 계통측 인덕터 L_g 의 값을 구한다.

2.2 시뮬레이션

시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

System Parameter	
Power	5kW
DC link V	400V
Switching Freq	5kHz
line to line V(rms)	220V
Grid Freq	60Hz

표 1. 시스템 파라미터.
Table 1. System parameter.

위의 설계과정에서 고조파 전류 감쇄율의 설정 범위에서 어떤 값을 쓰느냐에 따라 각각의 인덕터 값이 정해지는데 각 설정된 감쇄율에 따라 필터의 값을 시뮬레이션 해봄에 따라 그림 1과 같은 분석결과 그래프를 얻을 수 있다. 그래프 결과에서 볼 수 있듯이 a 가 1~3.18까지 변할시 출력전류의 THD는 2.4%에서 2.8%이이며 인버터측 인덕터 전류 리플값은 6~14A까지 변화하고 있다. THD와 전류리플의 크기를 고려하여 a 의 값을 2로 설정하여 표 2와 같은 LCL필터 파라미터 값을 설계하였다.

LCL 필터 파라미터	
L_i	1.4mH
L_g	0.75mH
C_f	14uF
f_{res}	Hz

표 2. LCL 필터 파라미터.
Table 2. LCL filter parameter.

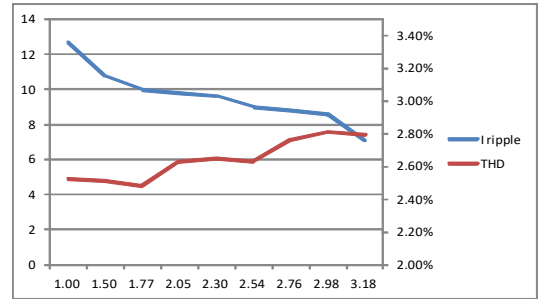


그림 1. a 의 따른 출력전류 THD와 인버터측 인덕터 리플 전류의 변화.

Figure 1. According to a change in the output current THD and inverter side inductor ripple current.

2.3 실험 결과

각 파라미터값을 실제 실험에 적용하여 실험한 결과 출력 전류의 파형은 그림 2과 같다. 위의 파형이 계통측 전류이고 밑의 전류가 인버터측 전류이다. 인버터 최대 전류 리플값은 9A정도로 측정되었으며 출력 전류 THD는 2.6%로 측정 되었다.

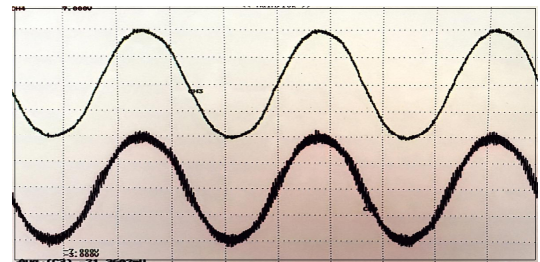


그림 2. 출력 전류파형(위), 인버터측 전류파형(아래)
Figure 2. Output Current(up), inverter side Current(down)

3. 결 론

본 논문에서는 계통 연계형 인버터에 적용되는 LCL필터 설계방법에 계통 전류의 고조파 기준을 만족하면서 인버터측 인덕터의 전류리플을 분석하고 필터에서의 전압강하를 줄이고 인버터와 제어기에 부담을 최소화하는 최적의 LCL 필터를 설계하였다. 최종적으로 설계된 LCL필터를 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 검증하고, 이를 실제 계통 연계형 인버터에 적용하여 실험을 진행하였으며 필터의 성능을 검증하였다. 향후 계통의 임피던스를 고려하면서 리플 감쇄 효과가 더욱 커지는 필터설계에 관한연구와 공진현상을 줄이는 것에 관한 연구를 진행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] M.Liserre, F.Blaabjerg, and S.Hansen. Design and control of a LCL filter based three phase active rectifier. IEEE Trans. Industry Applications. pp. 1281 1290, vol.41, 2005
- [2] Zhangping Shao, Xing Zhang, Fusheng Wang and Fei Li. A Novel Design Method of LCL filter for Grid interconnected Three Level Voltage Source Inverter. IEEE, June 2 5, 2012