

단상 계통연계 인버터의 LCL필터 최적 설계기법

정아진, 정세형, 최세완
서울과학기술대학교

Optimized LCL Filter Design Method of Single-Phase Utility Interactive Inverter

Ahjin Jung, Sehyung Jung, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

중요부하가 존재하는 계통연계 단상 인버터에서 LCL필터 설계시 계통으로 주입하는 전류뿐만 아니라 중요부하 전압품질도 고려되어야 한다. 또한, LCL필터의 가격과 부피측면을 고려하여 고조파 감쇠율 기준을 만족하면서 인덕턴스와 캐패시턴스는 가능한 작게 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 계통 전류의 고조파 기준을 만족하고, LCL필터 모델로부터 구해지는 전달함수를 이용하여 계통연계시와 독립운전시 모두 중요부하의 전압품질이 만족하도록 단상 인버터의 필터설계를 한다. 또한, 중요부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용한 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

1. 서론

최근 전 세계적인 에너지 및 자원 위기로 신재생에너지의 보급에 대한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이에 따라 신재생에너지를 계통에 접속하기 위한 계통연계 기술이 요구되고 있다. 신재생에너지의 안정적인 공급, 에너지 효율 극대화 및 계통 안정화를 위해 계통의 잉여전력을 배터리에 저장하거나 부족전력을 공급해주는 에너지 저장시스템(ESS : Energy Storage System)에 대한 필요성이 증대되고 있다. 또한 중·대 규모 에너지 저장시스템 뿐 아니라 소규모로 계통과 연계가 가능한 가정용 에너지 저장시스템도 최근 주목을 받고 있다. 특히 중요부하를 갖는 가정용 에너지 저장시스템에서 단상 계통연계 인버터는 계통이상시 독립운전으로 전환하여 중요부하에 안정적인 전력을 공급해야 한다.

단상 계통연계 인버터에서 기존 LCL필터 설계방법[1]들은 계통연계 모드와 독립운전 모드 두 가지 모드를 고려하여 설계하지 않고 설계 제한조건을 만족시키지 못할 수 있을 뿐만 아니라 잘못된 필터 설계로 인해 시스템의 성능저하와 가격증가의 원인이 될 수 있다. 또한, PWM기법에 따라 출력전압의 THD가 다르므로 사용한 PWM기법에 맞는 LCL필터 설계가 이루어져야 한다.

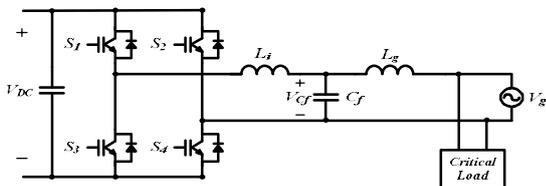


그림 1 중요부하를 갖는 단상 계통연계형 인버터 회로도

본 논문에서는 단상 계통연계 인버터에서 Unipolar PWM기법을 고려하여 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 설계자가 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용하여 선정할 수 있는 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

2. 제안하는 LCL필터 최적설계 기법

단상 계통연계 인버터에서 PWM기법은 두 가지가 있다. Bipolar 기법과 Unipolar 기법이 있는데 Bipolar 기법에 비해 Unipolar 방식이 출력전압의 THD가 우수하므로 단상 인버터 제어시에 Unipolar 기법을 많이 사용하는 경향이 있다. Unipolar 기법을 사용하게 되면 출력의 스위칭 주파수가 두배가 되기 때문에 이에 따른 정확한 LCL 필터 설계 방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Unipolar 기법에 맞는 LCL 필터 설계 방법을 제안한다. 먼저 수식 (1)은 인버터 출력전압 공식으로부터 구할 수 있다.

$$V_{i,sw} = \frac{m_{a,sw} \cdot V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (\text{여기서 } m_{a,sw} = 0.314) \quad (1)$$

식(1)과 문헌[2]으로부터 L_i , C_f , L_g 식을 구할 수 있다.

$$L_i = \frac{m_{a,sw} \cdot V_{dc} \cdot V_g}{\omega_{sw} \cdot r_{Li} \cdot P} \quad (\text{여기서 } r_{Li} = I_{Li,sw}/I_{Li,l}) \quad (2)$$

$$C_f = \frac{P \cdot r_{Li} \cdot A}{V_g^2 \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}} \quad (3)$$

(여기서 $r_{Cf} = V_{Cf,sw}/V_{Cf,l}$, $A = V_{dc} (m_{a,sw}/1.414) \cdot V_g \cdot r_{Cf}$)

$$L_g = \frac{V_g^2 \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf} (r_{Li} - r_{Lg})}{\omega_{sw} \cdot P \cdot r_{Li} \cdot r_{Lg} \cdot A} \quad (4)$$

(여기서 $r_{Lg} = I_{Lg,sw}/I_{Lg,l}$)

LCL필터 설계 시 전체 인덕턴스 크기(L_l), 캐패시턴스(C_f), 공진주파수(ω_{res})를 제한되는데 이 조건을 만족하는 필터 설계 영역을 구하는 식은 아래와 같다.[2]

$$r_{Li} \geq \frac{V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Lg} (m_{a,sw} \cdot A - \sqrt{2} r_{Cf} \cdot V_g)}{\sqrt{2} V_g (0.1 \cdot \omega_{sw} \cdot r_{Lg} \cdot A - V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Cf})} \quad (5)$$

$$r_{Li} \leq \frac{0.05 \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}}{\omega_1 \cdot A} \quad (6)$$

$$r_{Li} \geq \frac{r_{Lg} (m_{a,sw} \cdot 1.25A - \sqrt{2} r_{Cf} \cdot V_g)}{0.25m_{a,sw} \cdot A - \sqrt{2} r_{Cf} \cdot V_g} \quad (7)$$

$$r_{Li} \leq \frac{r_{Lg}[\omega_{sw}^2(m_{a,sw} \cdot A - \sqrt{2}r_{Cf} \cdot V_g) + 100\omega_1^2 \cdot m_{a,sw} \cdot A]}{100\omega_1^2 \cdot m_{a,sw} \cdot A - \sqrt{2}\omega_{sw}^2 \cdot r_{Cf} \cdot V_g} \quad (8)$$

제안하는 LCL필터 최적설계 과정은 다음과 같다.

먼저 총 인덕턴스, 캐패시턴스, 공진주파수 제한상수 같은 초기 값을 선정한다. 그리고 식(5), (6), (7), (8)을 이용하여 필터설계조건을 만족하는 영역 계산(r_{Cf} , r_{Li})한다. 그리고 설계한 영역 내에서 설계자가 아래의 각 성능에 가중치를 두어서 최적의 LCL 필터 값 영역을 구한다.

- E_1 : 총 인덕턴스 L_t (LCL필터 부피)
- E_2 : 필터 커패시턴스 C_f (무효전류량)
- E_3 : 독립부하 전압리플을 r_{Cf} (독립부하 전압품질)
- E_4 : 공진주파수 ω_{res} (시스템 밴드위스)

위의 각 평가기준에 따라 가중치 λ 를 고려한 평가식은

$$Eval = E_1 \cdot \lambda_1 + E_2 \cdot \lambda_2 + E_3 \cdot \lambda_3 + E_4 \cdot \lambda_4$$

이다. 위 식의 결과 값인 Eval이 조건에 따라 최대 또는 최소가 되는 r_{Li} 와 r_{Cf} 로부터 최적의 필터 값을 구할 수 있으며 최적 필터값은 각 평가기준에 부여되는 가중치 λ 에 따라 달라

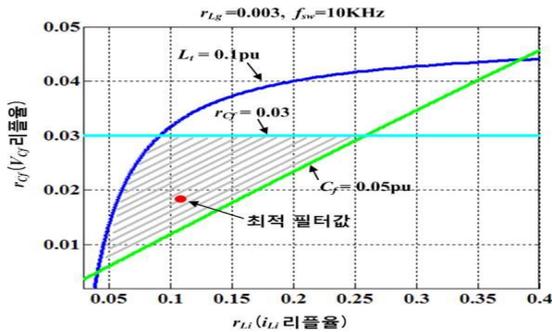


그림 2. 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역과 최적 필터값

질 수 있다. 최종 선정된 r_{Li} , r_{Cf} 값을 식(2), (3), (4)에 대입하여 최적 LCL필터값 계산한다. 그리고 마지막으로 설계조건 만족여부 확인(L_t , C_f , ω_{res})한다.

그림 2는 스위칭주파수를 10kHz, $r_{Lg}=0.003$, $r_{Cf} \leq 0.03$ (IEEE519[3]규정을 적용)로 필터를 설계한 경우 위의 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

단상 계통연계 인버터에서 제안한 LCL필터 최적설계의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션으로 검증 하였다. 다음은 시뮬레이션에서 사용한 사양 및 파라미터이다.

$$\cdot P = 3kW \quad \cdot V_g = 220V \quad \cdot f_{sw} = 10kHz \quad \cdot r_{Lg} = 0.003$$

< LCL필터 최적설계 파라미터 >

$$\begin{aligned} \cdot \lambda_1 &= 0.2 & \cdot \lambda_2 &= 0.4 & \cdot \lambda_3 &= 0.3 & \cdot \lambda_4 &= 0.1 \\ \cdot L_t &= 2.4mH & \cdot C_f &= 2\mu F & \cdot L_g &= 20\mu H \\ \cdot r_{Li} &= 0.018 & \cdot r_{Cf} &= 0.0063 \end{aligned}$$

그림 3는 계통연계시 부하전압 V_{Cf} , 계통전류 i_{Lg} , 인버터전류 i_{Li} 각 파형으로 THD는 5%이하로 계통연계 규정을 만족한다. 인버터전류 기본파에 대한 계통전류 스위칭성분(r_{Lg}) 시뮬레이

션 측정값은 0.0029(설계목표값:0.003)(그림 4), 부하전압 기본파에 대한 스위칭성분(r_{Cf}) 시뮬레이션 측정값은 0.0059(설계목표값:0.03이내)(그림 5)로 설계목표를 모두 만족한다.

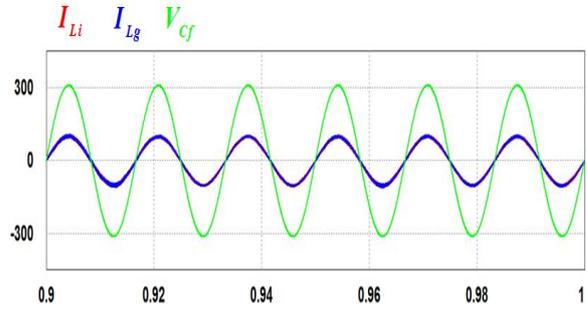


그림 3. 계통연계 시 부하 전압 및 인덕터 전류, 계통전류 파형

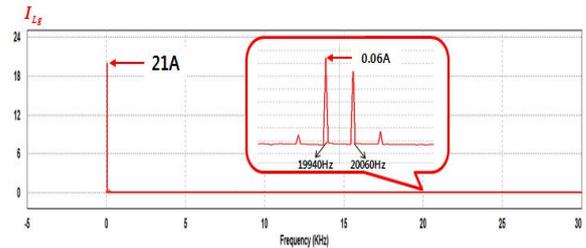


그림 4. 계통연계 시 계통전류(I_{Lg}) FFT

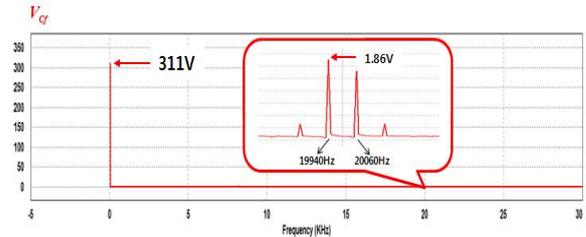


그림 5. 계통연계 시 부하전압(V_{Cf}) FFT

4. 결론

본 논문에서는 중요부하를 갖는 단상 계통연계 인버터에서 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 중요부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용한 LCL 필터 최적설계방법을 제안하였다. 그리고 LCL설계영역을 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역으로 나타내어 분석하였다. 제안하는 최적 설계방법으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 타당성을 증명하였다. 최종논문 발표 시 실험을 통해 논문의 제어기법을 검증하겠다.

참고 문헌

- [1] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL filter based active rectifier", *IEEE Ind. Applicat.*, Vol. 1, pp. 297-307, Oct. 2001.
- [2] 정상혁, 김형진, 최세환, 김태희, 이기풍, 이태원, "계통연계 및 독립운전을 하는 계통연계 인버터의 LCL필터 최적 설계기법", 전력전자학회 2011년도 추계학술대회 논문집 2011.11, pp. 65-66
- [3] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE Std. 519-1992*.