

계통연계형 NPC 인버터를 위한 LCL필터 최적 설계기법

정상혁, 최세완, 김경환*
 서울과학기술대학교, *카코뉴에너지

Optimized LCL Filter Design Method for Utility Interactive Neutral Point Clamped Inverter

Sanghyuk Jung, Sewan Choi, Kyunghwan Kim
 Seoul National University of Science and Technology, *KACO new energy Inc

ABSTRACT

NPC 인버터는 높은 효율과 우수한 출력 THD로 계통연계 시스템에 많이 채용되고 있다. 이때 LCL필터는 계통연계 기준을 만족하면서 가격과 부피측면을 고려하여 인덕턴스와 캐패시턴스는 가능한 작게 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 계통연계형 NPC 인버터에서 PWM기법을 고려하여 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 설계자가 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용할 수 있는 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

1. 서론

NPC 인버터는 고압으로 계통에 연계하는 수 MW급 이상의 대용량 발전시스템 뿐아니라 kW급 또는 수백 kW급의 계통연계 인버터에서도 많이 사용되고 있다. 인버터의 PWM 동작으로 인하여 발생하는 고조파성분은 IEEE1547 규정에 의해 제한하여야 한다. LCL필터는 저가격과 작은 부피로도 고조파를 효율적으로 저감시킬 수 있는 장점 때문에 많이 사용되고 있으며, 여러 LCL필터 설계방법들^{[2][3]}이 제시되었다. 하지만 기존 설계방법들은 2 레벨 인버터를 기준으로 하기 때문에 NPC 인버터에 그대로 적용하는 경우 설계 제한조건을 만족시키지 못할 수 있을 뿐만 아니라 잘못된 필터 설계로 인해 시스템의 성능저하와 가격증가를 부를 수 있다. 또한, PWM기법에 따라 출력전압의 THD가 다르므로 사용한 PWM기법에 맞는 LCL필터 설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 계통연계형 NPC 인버터에서 PWM기법을 고려하여 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 설계자가 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용할 수 있는 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

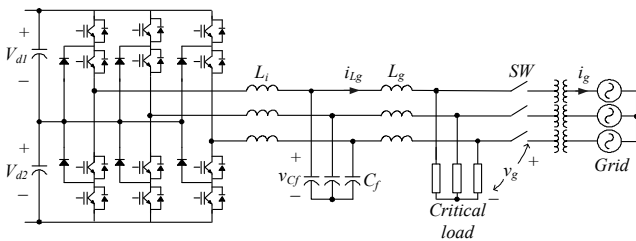


그림 1. 독립부하를 갖는 계통연계형 3-레벨 NPC 인버터

2. 제안하는 LCL필터 최적설계 기법

그림 2는 NPC 인버터의 PWM을 생성하는 파형으로서 IPD(In Phase Disposition)방식에 3고조파를 주입하여 높은 DC링크 이용률과 낮은 THD를 얻을 수 있다.

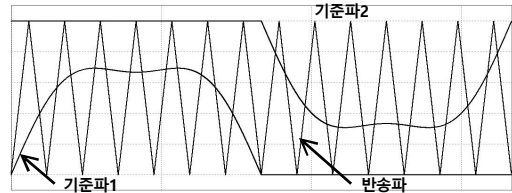


그림 2. IPD - THIPWM 파형

그림 3은 IPD THIPWM방식에서 m_a 에 따른 출력전압 스위칭성분($m_{a,sw}$)크기의 그래프이다.

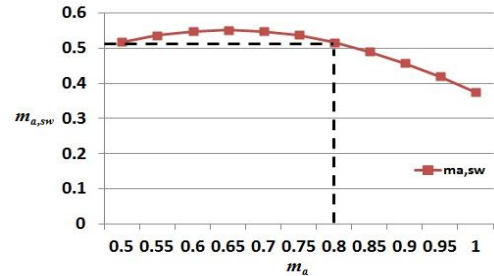


그림 3. m_a 에 따른 출력전압 스위칭성분값 ($m_{a,sw}$)

그림3을 이용하여 $m_a=0.8$ 일때, $V_{i,sw}$ 은 다음과 같다.

$$V_{i,sw} = \frac{0.516 \cdot V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

식(1)과 문헌[3]으로부터 L_i , C_f , L_g 식을 구할 수 있다.

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

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

여기서 $r_{Cf} = V_{G,sw}/V_{G,l}$, $A = V_{dc} \cdot 5.5 \cdot V_g \cdot r_{Cf}$ 임

$$L_g = \frac{3 \cdot V_g^2 \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf} (r_{Li} - r_{Lg})}{\omega_{sw} \cdot P \cdot r_{Li} \cdot r_{Lg} \cdot A} \quad (4)$$

여기서 $r_{Lg} = I_{Lg,sw}/I_{Lg,l}$ 임

LCL필터 설계 시 전체 인덕턴스 크기(L_i), 캐패시턴스(C_f), 공진주파수(ω_{res})를 제한하는데 이 조건을 만족하는 필터 설계 영역을 구하는 식은 아래와 같다.^[3]

$$r_{Li} \geq \frac{1.81V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Lg}(2A - V_{dc})}{V_g(\omega_{sw} \cdot r_{Lg} \cdot A - 10V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Cf})} \quad (5)$$

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

$$\frac{r_{Lg}(2.25A - V_{dc})}{1.25A - V_{dc}} \leq r_{Li} \leq \frac{r_{Lg}[\omega_{sw}^2(2A - V_{dc}) + 100\omega_1^2 \cdot A]}{100\omega_1^2 \cdot A - \omega_{sw}^2(V_{dc} - A)} \quad (7)$$

제안하는 LCL필터 최적설계 과정은 다음과 같다.

STEP1. 초기값 선정

총 인덕턴스, 캐패시턴스, 공진주파수 제한상수 선정

STEP2. 식(5), (6), (7)을 이용하여 필터설계조건을 만족하는 영역 계산(r_{Cf} , r_{Li})

STEP3. 이 영역내에서 설계자가 아래의 각 성능에 가중치를 두어 최적의 LCL필터 값을 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 결과값인 $Eval$ 이 조건에 따라 최대 또는 최소가 되는 r_{Li} 와 r_{Cf} 로부터 최적의 필터값을 구할 수 있으며 최적 필터값은 각 평가기준에 부여되는 가중치 λ 에 따라 달라질 수 있다.

STEP4. 최종 선정된 r_{Li} , r_{Cf} 값을 식(2), (3), (4)에 대입하여 최적 LCL필터값 계산

STEP5. 설계조건 만족여부 확인(L_t , C_f , ω_{res})

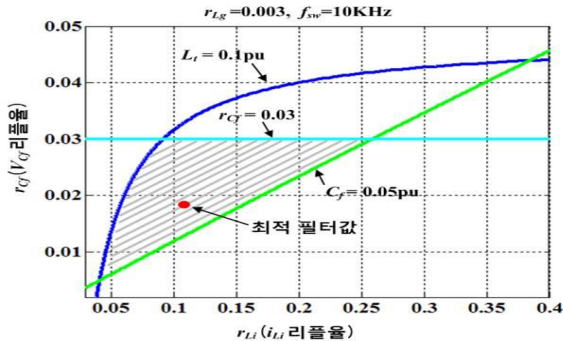


그림 4. 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역과 최적 필터값

그림 4는 스위칭주파수를 10kHz, $r_{Lg}=0.003$, $r_{Cf} \leq 0.03$ (IEEE519^[1]규정을 적용)로 필터를 설계한 경우 위의 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역을 나타낸다.

3. 실험 결과

제한한 3상 LCL필터 최적설계의 타당성을 입증하기 위하여 시작품을 제작하였다. 다음은 실험에서 사용한 파라미터이다.

$$\cdot P = 2kW \quad \cdot V_{LL} = 220V \quad \cdot f_{sw} = 10kHz \quad \cdot r_{Lg} = 0.003$$

< LCL필터 최적설계 파라미터 >

$$\begin{aligned} \cdot \lambda_1 &= 0.6 & \cdot \lambda_2 &= 0.1 & \cdot \lambda_3 &= 0.1 & \cdot \lambda_4 &= 0.2 \\ \cdot L_t &= 2.2mH & \cdot C_f &= 5.8\mu F & \cdot L_g &= 1.4mH \\ \cdot r_{Li} &= 0.103 & \cdot r_{Cf} &= 0.0185 \\ \cdot L_t &= 0.056PU & \cdot C_f &= 0.05PU & \cdot f_{res} &= 2.24kHz \end{aligned}$$

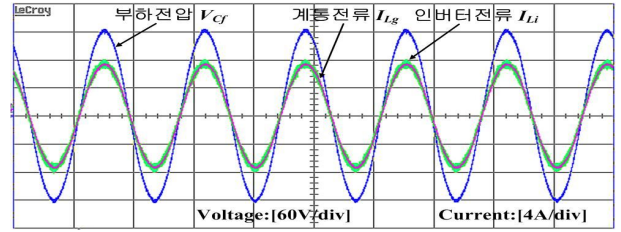


그림 5. 계통연계 시 부하전압 및 계통전류, 인버터전류 파형

그림 5는 계통연계시 부하전압 V_{Cf} , 계통전류 I_{Lg} , 인버터전류 I_{Li} 각 파형에서 THD는 5%이하로 계통연계 규정을 만족한다. 인버터전류 기본파에 대한 계통전류 스위칭성분(r_{Lg}) 측정값은 0.0025(설계목표값:0.003)(그림 6), 부하전압 기본파에 대한 스위칭성분(r_{Cf}) 측정값은 0.015(설계목표값:0.03이내)(그림 7)로 설계목표를 모두 만족한다.

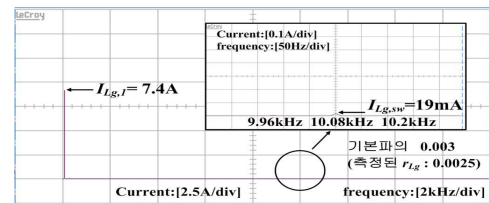


그림 6. 계통전류(I_{Lg}) FFT

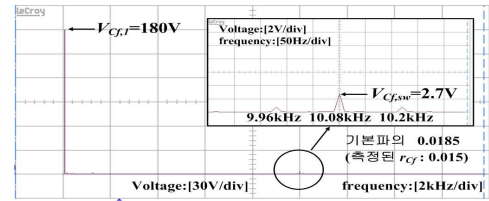


그림 7. 부하전압(V_{Cf}) FFT

4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 3 레벨 NPC 인버터에서 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용한 LCL필터 최적설계방법을 제안하였다. 그리고 LCL설계영역을 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역으로 나타내어 분석하였다. 제안하는 최적 설계방법으로 실험을 진행하였으며, 타당성을 증명하였다.

이 논문은 카오뉴에너지(주)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE Std.* 519 1992.
- [2] 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.
- [3] 정상혁, 김형진, 최세완, 김태희, 이기풍, 이태원, "계통연계 및 독립운전을 하는 계통연계 인버터의 LCL필터 최적 설계기법", 전력전자학회 2011년도 추계학술대회 논문집 2011.11, pp. 65 66
- [4] M. Liserre, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "Grid Filter Design for a Multimewatt Medium Voltage Voltage Source Inverter", *IEEE Ind. Applicat.*, Vol. 58, pp. 1205 217. April. 2011.