

LCL-필터를 갖는 단상 계통연계형 인버터에서의 구리와 알루미늄 권선 인덕터의 비교

전영태, 박중후
 숭실대학교

A Comparison of inductors composed of copper or aluminum wire for a single-phase grid-connected inverter using LCL-filter

Young-Tae Jeon, Joung-Hu Park
 Soongsil University, Seoul

ABSTRACT

펄스폭 변조 기법 (Pulse width modulation)을 사용하는 단상 인버터의 출력은 기본주파수 성분만이 아니라 고조파의 성분을 포함하고 있기 때문에 고조파 저감을 위한 필터의 사용이 필연적이다. LCL 필터는 기존의 L이나 LC 필터에 비해 시스템의 크기와 부피를 줄이며 동시에 전류 리플 감쇠 효율 등의 필터 성능이 뛰어나 최근 사용이 증가하는 추세이다.

본 논문에서는 LCL-필터의 인덕터에 알루미늄 권선을 적용하기 위해 커패시터의 직렬 댐핑 저항과 더불어 인덕터의 권선 저항 또한 추가하여 필터의 전달함수를 고려하였다. 알루미늄은 구리 보다 전도율이 낮아 저항이 크지만, 구리에 비해 가볍고 가격이 저렴한 장점이 있다. 이를 계통 연계형 인버터에 적용하기 위해, 인덕터의 저항 성분 차이에 따른 댐핑 (damping) 효과를 시뮬레이션을 통해 분석하였고 구리 권선과 알루미늄 권선을 사용한 인덕터를 각 제작하여 500 W 급 하드웨어 실험을 통해 전력변환장치에서의 알루미늄 권선 인덕터 적용 가능성을 확인하였다.

각각 구리와 알루미늄 권선으로 인덕터를 제작하였다. 현재까지, 알루미늄선은 경량성을 중시하는 용도의 전력전송용 케이블 등으로 사용되어왔으며^[2] 이를 계통연계형 인버터의 인덕터 제작에 적용하였다. 이미 알려진 바와 같이 알루미늄의 전도율은 구리 전도율의 2/3가량이기 때문에 알루미늄선의 저항은 같은 굵기의 구리선에 비해 높지만 가격이 저렴하고^[3] 무게가 가볍다.^[2] 두 권선의 차이를 비교하기 위해 커패시터의 직렬 저항뿐만 아니라 인덕터의 저항까지 고려한 필터의 전달함수를 고려하여 제어 루프를 설계하고 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한, 알루미늄 권선으로 인덕터를 제작하여 LCL-필터를 적용한 인버터의 동작을 하드웨어를 통해 확인하였다.

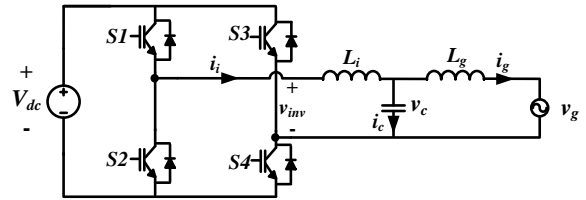


그림 1. LCL-필터를 갖는 단상 계통연계형 인버터

1. 서론

분산전원용 계통연계 인버터의 수요가 증가함에 따라 인버터의 스위칭 동작으로 인한 고조파 성분을 제거하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 고조파 성분은 계통과 부하에 악영향을 미치므로 반드시 제거되어야 하는데, 그동안 고조파를 제거하기 위하여 사용했던 L-필터는 시스템의 용량이 증가할수록 인덕턴스가 크게 요구되고 이에 따라 시스템의 부피증가, 가격상승, 전압강하 등의 문제점을 갖는다. LC-필터는 L-필터에 비해 고조파 저감율이 높지만 여전히 부피가 크며 L과 C로 인한 공진이 발생한다. 따라서, 최근 L, LC-필터의 단점을 극복하고자 LCL-필터를 적용한 시스템이 고안되었다. LCL-필터는 L-필터와 LC-필터에 비해 필터의 용량을 줄이면서도 우수한 고조파 제거 효과를 갖고 있어 부피와 가격면에서 유리하다.^[1] 하지만, 여전히 LCL 소자에 의한 공진 문제를 수반하여 안정적인 시스템의 설계가 어려운 단점이 존재한다. 위와 같은 공진 문제를 해결하기 위해 수동 (passive), 능동 (active), 하이브리드 (hybrid) 댐핑 (damping) 기법 등이 있으며, 가장 간단한 수동 댐핑 기법 중 하나는 필터의 커패시터에 직렬 저항을 추가하여 필터의 공진을 감쇠하는 것이다.

본 연구에서는 이러한 수동 댐핑 기법을 적용하고 계통 연계형 인버터에서 인덕터 권선에 따른 차이를 비교하기 위하여

2. 본론

2.1 LCL 필터의 설계

그림 1은 LCL-필터를 갖는 단상 계통연계형 인버터를 나타낸다. 인버터의 스위칭 기법으로는 unipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM)이 사용되었다. 인버터 스위치의 출력전압은 PWM 전압으로 고조파 성분을 포함하며 이는 계통에 고조파 전류를 야기하므로 필터링을 위해 LCL-필터를 갖는다. 인버터측 인덕터 L_i 의 전류 리플 (λ_i)은 스위치 스트레스, 인덕터 손실 등에 영향을 미치므로 제한되어야 하며, 기본파의 30% 리플을 갖는 인덕턴스 값을 식 (1)을 이용하여 계산하였다.^[4]

$$L_i = \frac{V_{dc}}{8\lambda_i I_i f_{sw}} \quad (1)$$

여기서, f_{sw} 는 스위칭 주파수, I_i 는 인덕터 전류, V_{dc} 는 직류 단 전압이다. 필터 커패시터 C 는 무효전력과 관련이 있어 값이 클수록 많은 무효전력을 야기한다. 따라서, 정격전력(P_o)에서 무효전력 흡수율(λ_c)을 고려하여 설계하며 식 (2)를 이용하여 일반적으로 정격의 5% 이내로 선정한다.^[1]

$$C < \lambda_c \frac{P_o}{\omega_o V_g^2} \quad (2)$$

단, ω_o 는 계통의 각주파수, V_g^2 는 계통 전압을 나타낸다. IEEE 고조파 규정에 따라 계통으로 유입되는 전류의 전고조파왜곡률 (Total harmonic distortion, THD)은 5% 이내로 제한되어야 하며 35번째 이상 고조파 항은 정격의 0.3% 이내로 설계해야 한다.^[5] 식(1), (2)에 의해 L_i 와 C 의 값이 정해졌으므로 h 번째의 고조파(ω_h) 감쇠를 위한 계통 측의 필터 인덕터 L_g 는 식 (3)으로부터 (4)와 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$\frac{|i_g(j\omega_h)|}{|v_{inv}(j\omega_h)|} = \frac{1}{|L_i L_g C (j\omega_h)^3 + j\omega_h(L_i + L_g)|} \quad (3)$$

$$L_g = \frac{1}{L_i C \omega_h^2 - 1} \left(L_i + \frac{|V_{inv}(j\omega_h)|}{\omega_h \lambda_h I_g} \right) \quad (4)$$

단, i_g 는 계통 전류, v_{inv} 는 인버터 출력전압이다. LCL-필터의 공진억제를 위한 커패시터의 직렬 댐핑 저항은 일반적으로 공진주파수의 필터 커패시터 임피던스의 1/3 수준으로 설계한다. 필터의 공진주파수 f_r 와 댐핑 저항 R_d 은 (5), (6)과 같이 정의한다.^[1]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C}} \quad (5)$$

$$R_d = \frac{1}{6\pi f_r C} \quad (6)$$

설계한 필터의 공진주파수는 스위칭 주파수(f_{sw})보다 낮아야 하며 제어의 안정성을 확보하기 위해 계통 주파수($f_o=60$ Hz)의 10배보다 높아야 한다. 필터의 공진주파수는 다음 (7)을 만족해야 한다.^[1]

$$10f_o < f_r < 0.5f_{sw} \quad (7)$$

2.2 전류제어기 설계

LCL-필터를 갖는 계통연계형 인버터의 모델을 그림 2에 나타냈다. 댐핑 저항과 함께 인덕터의 권선 저항을 포함하는 인버터 출력전압으로부터 계통 전류에 대한 전달함수는 식 (8)과 같다. 그림 3은 댐핑 저항을 포함한 전달함수와 그렇지 않은 경우의 보데 (Bode) 선도를 나타낸다. 식(5)의 공진주파수 $f_r=9.28$ kHz에서 공진이 발생하고 이를 댐핑 저항을 통해 공진을 감쇠한 것을 확인할 수 있다. 또한 인버터의 권선 저항 성분이 있을 때와 없을 때를 비교하여 그림 3에 나타냈다. 이를 고려하여 차단주파수 $f_c=790$ Hz, 위상마진 87° 로 인버터의 계통 전류 제어기를 설계하여 비례이득 $K_p=0.025$, 적분 이득 $K_i=7.5$ 을 얻었다. 시뮬레이션 관련 변수들은 표 1에 정리하였으며, 인덕터의 권선 저항 성분은 실제 알루미늄 권선으로 제작한 인덕터의 저항을 고려하였다.

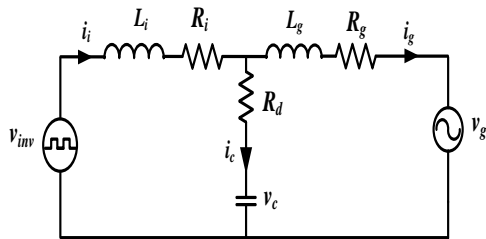


그림 2. 저항성분을 포함한 계통연계형 인버터의 모델

$$\frac{i_g(s)}{v_{inv}(s)} = \frac{1 + R_d C s}{L_i L_g C s^3 + A_1 C s^2 + B_1 s + R_i + R_g} \quad (8)$$

$$A_1 = \{(R_i + R_g)L_g + (R_g + R_d)L_i\}C$$

$$B_1 = (L_i + L_g) + (R_i R_g + R_g R_d + R_d R_i)C$$

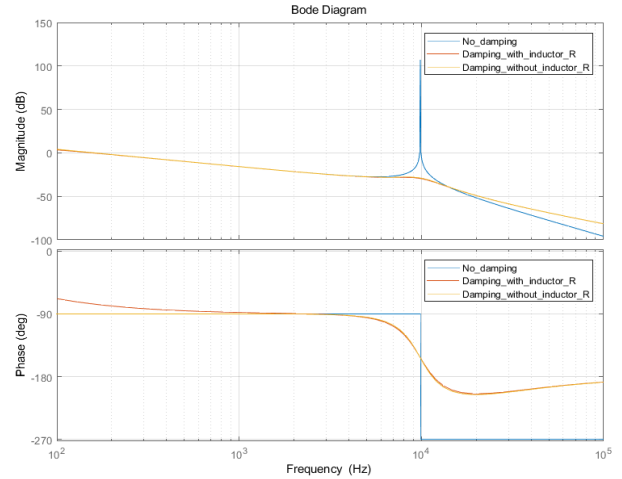


그림 3. 댐핑 저항 유무와 인덕터 권선 저항에 따른 보데 선도

표 1. 시뮬레이션 변수

변수	값	변수	값
L_i	920 μ H	R_i	0.15 Ω
L_g	80 μ H	R_g	0.01 Ω
C	4 μ F	R_d	2 Ω
V_{dc}	200 V	V_g	110 V
f_r	9.28 kHz	f_c	790 Hz
f_{sw}	20 kHz	f_o	60 Hz
P_o	500 W	K_p/K_i	0.025/7.5

2.3 시뮬레이션

식 (1)~(4)를 바탕으로 설계한 LCL-필터를 갖는 단상 계통연계형 인버터의 모델을 PSIM 툴을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 표 1의 변수들에 의거하여 시뮬레이션 하였고, 계통의 주파수 동기화를 위하여 SOGI-PLL (second order generalized integrator-phase locked loop) 기법을 사용하였으며, PI (proportional-integral) 제어기를 d-q축 제어를 위해 적용하였다. 그림 4는 설계한 LCL-필터를 바탕으로 계통 전압과 필터의 출력 전류 파형을 나타낸다. 인버터단 전류의 THD는 7.2%로 나타나고 계통측 전류의 THD는 1.7%로 IEEE 규정을 만족하는 것을 확인하였다. 그림 5는 인버터 측과 계통측 전류의 FFT(Fast fourier transform) 분석 결과를 나타낸다. IEEE 규정에 따라 계통으로 유입되는 전류의 35번째 이상 고조파 성분은 0.3% 이내로 제한되어야 한다. Unipolar PWM 인버터의 고조파 성분은 스위칭 주파수의 2배 성분이 가장 크게 나타나므로 이를 제한하여 LCL-필터의 출력 전류인 계통 전류 고조파의 크기가 0.02 A 로 규정을 만족하는 것을 확인하였다.

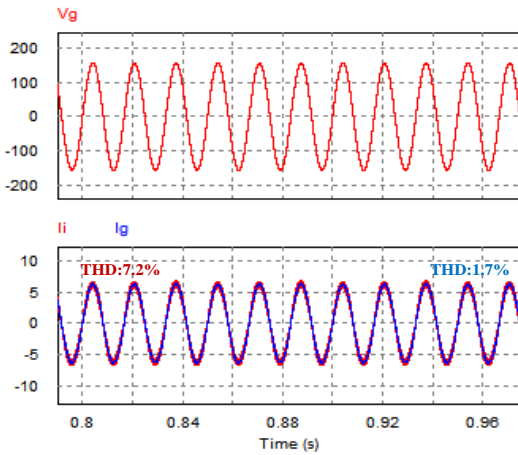


그림 4. LCL-필터의 출력 전류와 계통 전압 파형

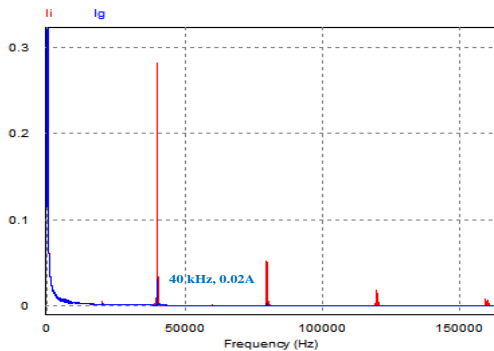


그림 5. LCL-필터 출력 전류의 FFT 분석 결과

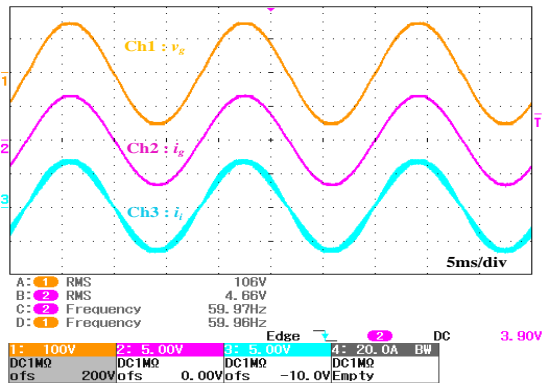


그림 6. 알루미늄 인덕터를 갖는 인버터의 실험 파형

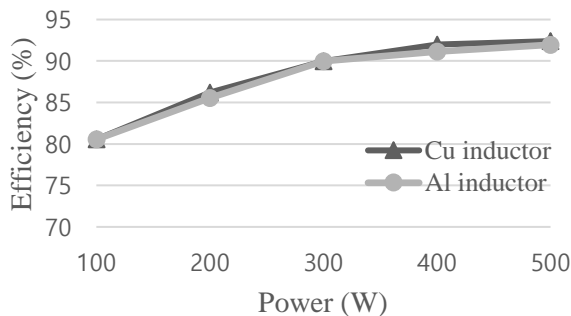


그림 7. 알루미늄과 구리 인덕터를 갖는 인버터의 효율 비교

표 2. 인버터 측 알루미늄과 구리 인덕터 비교

	구리	알루미늄
인덕턴스	920 μ H	
권선 저항	0.05 Ω	0.15 Ω
코어	CH400125	
턴 수	75	
무게	126 g	98 g
권선 직경	1.2 mm	

2.4 실험 결과

실험을 위해 500 W 급 인버터 프로토타입을 제작하여 진행하였으며 사용된 알루미늄선을 이용한 인덕터와 구리 인덕터의 (인버터 측, L) 특징을 표 2에 정리하였다. 같은 직경의 권선을 사용하여 각각 인덕터를 제작하였으며 전도율이 낮은 알루미늄 인덕터는 저장성분이 높으나 구리에 비해 22% 가벼운 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 알루미늄 인덕터를 적용한 하드웨어 파형으로 시뮬레이션과 동일한 파라미터를 바탕으로 진행되었다. 계통 측의 전류와 인버터 측의 전류 파형 비교 시, 고조파 성분이 LCL-필터에 의해 감소된 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 알루미늄, 구리 인덕터를 사용한 인버터의 효율 측정 그래프이다. 알루미늄, 구리를 사용했을 경우 500 W에서 각각 최고 91.9%, 92.4%의 효율을 갖는다. 전체적으로, 알루미늄 코일을 사용한 인버터의 효율이 낮는데, 이는 기생 저항 성분이 구리 코일에 비해 높기 때문에 발생하는 손실 차이를 나타낸다.

3. 결론

본 논문에서는 인버터에서 알루미늄 권선을 사용한 인덕터와 구리 권선 인덕터를 비교하였다. LCL-필터 설계 후, 인덕터의 저항 성분을 고려하여 제어 루프를 설계해 시뮬레이션을 통해 계통 측 전류의 THD 1.7%로 IEEE 규정을 만족하는 것을 확인하였다. 하드웨어 프로토타입을 통해 알루미늄 코일로 이루어진 LCL-필터를 갖는 인버터 계통 측 전류의 고조파 성분 감소를 확인하였다. 현재 구리의 가격은 5745 \$/t, 알루미늄 가격은 1740 \$/t로 알루미늄 권선으로 비용 감소가 가능하며, 또한, 설계에 따라 본 연구에서는 효율 1%내의 차이로 알루미늄 인덕터의 무게가 구리 인덕터 무게에 비하여 22%의 감소하여 경량성이 요구되는 전력변환장치에서의 적용 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 박준영, 김석민, 서승규, 박성수, 이교범, “계통 연계형 3-레벨 인버터 시스템을 위한 LCL-필터 설계 방법”, 전기전자학회논문지, vol. 21, no. 2, pp.105-114, 2017.
- [2] 김정익, 진성우, 외4명, “알루미늄-구리 이중 도체 접합부에서 직류 전기 인가에 따른 금속화합물의 성장거동”, 대한금속-재료학회지, vol. 55, no. 6, pp.372-378, 2017.
- [3] 국가지표체계, “주요 비철금속 국제가격 동향”, 조달청, 2019
- [4] X. Ruan et al., “Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters”, Springer Nature Singapore Pte Ltd. and Science Press 2018
- [5] IEEE Application Guide for IEEE Std. 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE 1547.2- 2008, 2009.