

△-결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터의 모델링과 제어

李相仁^{*}, 李貴俊^{**}, 玄東石[†]

Modeling and Control of a Grid Connected VSI using a Delta Connected LCL Filter

Sang-In Lee, Kui-Jun Lee and Dong-Seok Hyun

요 약

삼상 계통 연계 인버터에서 LCL 필터를 연결시키는 두 가지 방법이 존재한다. 하나는 일반적으로 사용하는 Y-결선 LCL 필터가 있고 다른 형태로 △-결선 LCL 필터가 있다. Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 모델은 계산되어 있는 반면에, △-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 모델은 공식화되어 있지 않다. 그리하여 △-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 수학적 모델을 제안한다. 또한 Y-결선 LCL 필터와 △-결선 LCL 필터 각각의 커패시터에 흐르는 전류 고조파에 대한 비교를 포함한다. △-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템이 계통전류를 제어 하는데 더 유리함을 실험을 통해 입증한다.

ABSTRACT

There are two ways to connect an LCL filter in a grid-connected VSI. A wye connected LCL filter is general way, and the other is a delta connected LCL filter. While a model of a system with a wye connected LCL filter is calculated, a model of a system with a delta connected LCL filter is not formulated. Thus, we propose a mathematical model of a system with a delta connected LCL filter. Also, a comparative study of capacitor current harmonics of a delta connected LCL filter and a wye connected LCL filter is included. Experimental results exhibit that it is advantageous to control grid currents for a system with a delta connected LCL filter.

Key Words : LCL filter, Grid connected inverter, Modeling, Active damping

1. 서 론

계통 전압과 동상이며 낮은 TDD(total demand distortion)를 갖는 전류를 직류 전압원에서 계통으로

공급하기 위해 계통 연계 인버터를 사용한다. AC 신호를 DC 신호로 변환해 0에 가까운 정상 상태 오차를 유지할 수 있는 회전 좌표계 비례 적분 제어기를 사용하여, 첫 번째 목적을 달성한다. 두 번째 목적을 이룩하기 위해서 인버터 출력 단에 필터를 꼭 사용하여야 한다. 1차 시스템인 L필터보다 3 차 시스템인 LCL 필터가 고조파를 줄이는데 더욱 효과적이기 때문에, LCL 필터를 주로 사용하는 추세이다. LCL 필터를 사용하는 시스템의 전달 함수에 한 쌍의 공진 극점이 존

[†]교신저자 : 정회원, 한양대 전기생체제어공학부 교수
E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr
^{*}학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 석사과정
^{**}정회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정
접수일자 : 2008. 8. 25 1차 심사 : 2008. 10. 17
심사완료 : 2008. 10. 27

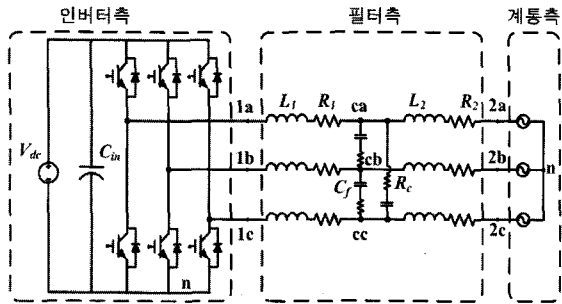


그림 1 Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터 시스템
 Fig. 1 Three phase grid connected VSI system with a delta connected LCL filter

재하는데, 이 공진 극점으로 인해 폐 루프 제어 시 안정도 문제가 발생한다. 공진을 억제하기 위한 방법으로는 커패시터에 직렬로 저항을 삽입하여 감쇠비(damping ratio)를 증가시키는 방법^[5], 진상 보상기(lead compensator)를 사용하여 커패시터 전압을 제한하는 내부 루프의 위상 여유(phase margin)를 증가시키는 방법^[3], 그 자체로 안정한 전달 함수의 출력인 커패시터 전류를 제한하여 비례 이득을 통해 이득 여유(gain margin)와 위상 여유를 조절하는 방법^{[4],[6]}이 있다. 만약 LCL 필터를 사용하는 시스템의 전달 함수를 모른다면, 위 열거한 방법을 사용할 수 없을 것이다. Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 전달 함수는 이미 계산되어져 있지만^{[3],[4],[5],[6]}, Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 전달 함수는 공식화되어져 있지 않다.

본 논문은 평형 Δ -결선 회로를 통해, Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터의 전달 함수를 제안한다. 이 수학적 모델은 인덕터와 커패시터에 존재하는 등가 직렬 저항(ESR)의 영향을 포함한다. 제어기 설계 시 주파수 응답 기법에 기초하여, 계통 전류를 제어하는 시스템의 설계를 해석적으로 묘사한다. 커패시터 전류를 제한하여 공진을 억제하는 내부 루프와 0에 가까운 정상 상태 오차를 달성하기 위한 외부 계통 전류 제어 루프로 구성된 제어 전략^[6]을 채택한다. Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템과 Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 각각에 대한 제어기를 설계한다. 제안한 수학적 모델과 설계한 제어기의 타당성을 입증하기 위해, Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템과 Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 각각에 대해 실험을 진행한다.

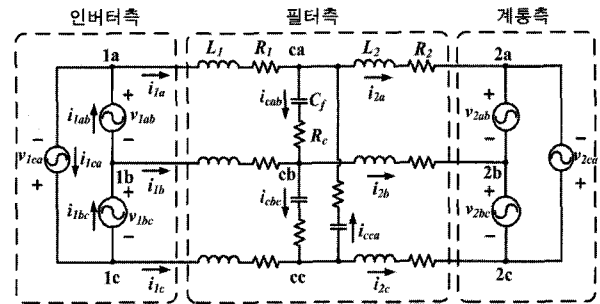


그림 2 등가 Δ -결선 회로
 Fig. 2 The equivalent delta circuit for the system in Fig. 1

2. 수학적 모델

Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터가 그림 1에 있다. 모델링을 수행하기 전에 입력 DC 전압 원 V_{dc} 는 일정하다는, 전력 반도체 소자가 이상적인 스위치인 그리고 이 시스템이 삼상 평형이라는 가정을 하고 시작한다. 이 가정으로 그림 1은 그림 2로 등가화 시킬 수 있다. 여기서

$v_{1ab}, v_{1bc}, v_{1ca}$	인버터 선간 전압
$v_{2ab}, v_{2bc}, v_{2ca}$	계통 선간 전압
i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}	인버터 선 전류
i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}	계통 선 전류
$i_{1ab}, i_{1bc}, i_{1ca}$	계산한 인버터 상 전류
$i_{cab}, i_{cbc}, i_{cca}$	커패시터 전류
1a, 1b, 1c	인버터 측 마디(node)
ca, cb, cc	커패시터 측 마디
2a, 2b, 2c	계통 측 마디
R_1, R_2, R_c	L_1, L_2 그리고 C_f 각각에 존재하는 등가 직렬 저항(ESR) 이다.

2.1 등가 Δ -결선 회로의 미분 방정식

루프 경로 1b-1a-ca-cb에서의 미분 방정식은 $-v_{1ab} + L_1 \frac{d}{dt}(i_{1a} - i_{1b}) + R_1(i_{1a} - i_{1b}) + v_{cab} = 0$ 이다. Δ -결선 회로의 선 전류와 상 전류 관계식을 적용하면, $-v_{1ab} + 3L_1 \frac{d}{dt}i_{1ab} + 3R_1i_{1ab} + v_{cab} = 0$ 이다. 동일한 방법을 적용하면 식 (1)을 얻을 수 있다. 같은 방식으로 루프 경로 cb-ca-2a-2b와 다른 경로에서 미분 방정식 (2)를 얻을 수 있다.

$$-\begin{bmatrix} v_{1ab} \\ v_{1bc} \\ v_{1ca} \end{bmatrix} + 3L_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1ab} \\ i_{1bc} \\ i_{1ca} \end{bmatrix} + 3R_1 \begin{bmatrix} i_{1ab} \\ i_{1bc} \\ i_{1ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cab} \\ v_{cba} \\ v_{bca} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$-\begin{bmatrix} v_{cab} \\ v_{dcb} \\ v_{cca} \end{bmatrix} + 3L_2 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{2ab} \\ i_{2bc} \\ i_{2ca} \end{bmatrix} + 3R_2 \begin{bmatrix} i_{2ab} \\ i_{2bc} \\ i_{2ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{2ab} \\ v_{2bc} \\ v_{2ca} \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

마디 ca와 cb에서 커패시터 C_f 양단 전압과 전류는 $C_f \frac{d}{dt} v_{cab} - R_c C_f \frac{d}{dt} i_{cab} = i_{cab}$ 식을 따른다. 여기서 v_{cab} 는 이상적인 커패시터와 기생 저항 모두에 걸리는 전압이다. 다른 경로에서 동일하게 적용하면 (3) 식을 얻는다.

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cab} \\ v_{dcb} \\ v_{cca} \end{bmatrix} - R_c C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cab} \\ i_{dcb} \\ i_{cca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cab} \\ i_{dcb} \\ i_{cca} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 시스템 전달 함수

$$\begin{aligned} [V_{1ab} \ V_{1bc} \ V_{1ca}]' &= V_1, & [V_{2ab} \ V_{2bc} \ V_{2ca}]' &= V_2, \\ [V_{cab} \ V_{dcb} \ V_{cca}]' &= V_c, & [i_{1ab} \ i_{1bc} \ i_{1ca}]' &= i_1, \\ [i_{2ab} \ i_{2bc} \ i_{2ca}]' &= i_2, & [i_{cab} \ i_{dcb} \ i_{cca}]' &= i_c \end{aligned}$$

이고, 모든 상태 변수의 초기 값이 0이라고 가정하면, 라플라스 변환 이론을 이용하여 식 (4)를 얻을 수 있다. 여기서 부호 '는 전치 행렬(transpose)을 의미한다.

$$\begin{cases} -V_1(s) + s \times (3L_1 + 3R_1)I_1(s) + V_c(s) = 0 \\ -V_c(s) + s \times (3L_2 + 3R_2)I_2(s) + V_2(s) = 0 \\ s \times C_f V_c(s) = (1 + s \times C_f R_c)I_c(s) \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)를 이용해서 시스템 전달 함수 (5)를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \frac{I_c(s)}{V_1(s)} = \frac{s C_f (3L_2 \times s + 3R_2)}{G_{s_den}} = G_{k1} \\ \frac{V_c(s)}{I_c(s)} = \frac{1 + s C_f R_c}{s C_f} = G_{k2} \\ \frac{I_2(s)}{V_c(s) - V_2(s)} = \frac{1}{3L_2 \times s + 3R_2} = G_{k3} \end{cases} \quad (5)$$

$$G_{s_den} = (3L_1 s + 3R_1) \{ s C_f (3L_2 s + 3R_2) + 1 + s C_f R_c \} + (1 + s C_f R_c) (3L_2 s + 3R_2)$$

2.3 △-결선 LCL 필터와 Y-결선 LCL 필터의 공진 주파수 비교

공진 주파수는 (5)의 분모인 $G_{s_den} = 0$ 으로 함으로

써 구할 수 있다. 따라서 △-결선 LCL 필터의 공진 주파수

$$f_{res,\Delta} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{3L_1 L_2 C_f}} \quad (6)$$

이다. 여기서 수식의 간단함을 위해 $R_1 = R_2 = R_c = 0$ 으로 하였다. Y-결선 LCL 필터의 공진 주파수는 이미 계산되어 있는 모델을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{res,Y} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (7)$$

즉, $f_{res,\Delta} = f_{res,Y} / \sqrt{3}$ 이다. 그림 3에서 V_{1a} 는 인버터의 등가 Y-결선 회로에서의 상 전압을 의미한다. Y-결선 회로와 △-결선 회로에 나타난 결과를 동등하게 비교하기 위해, △-결선 회로의 상 전압과 상 전류 크기를 Y-결선 회로의 상 전압 상 전류 크기로 변환하였다. 그림 3을 통해 알 수 있듯이, 만약 Y-결선 LCL 필터 대신에 △-결선 LCL 필터를 사용한다면 계통 전류는 더 적은 고조파를 함유할 것이다. 예를 들어 그림 1에서 인버터 출력 전압 v_{1an} 에 10kHz에서 고조파 전압 50 A가 존재한다고 가정하면, △-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템은 계통 선 전류에 10kHz에서 약 3.013mA 고조파를 함유하는 반면에 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템은 계통 선 전류에 약 9.310mA 고조파를 포함하게 될 것이다. 즉 △-결선 LCL 필터는 Y-결선 LCL 필터보다 공진 주파수 이상의 고조파에 대해서 약 10dB 정도의 고조파 저감에 대한 이점이 있다.

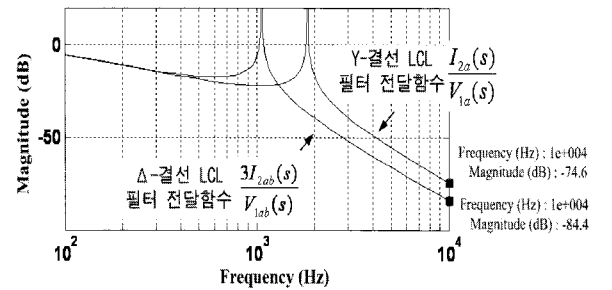


그림 3 △-결선 LCL 필터 전달 함수와 Y-결선 LCL 필터 전달 함수의 크기 주파수 응답

Fig. 3 Magnitude responses of transfer functions with a delta connected LCL filter and with a wye connected LCL filter when $L_1 = L_2 = 1.5mH$ and $C_f = 10\mu F$.

3. 제어 시스템 설계

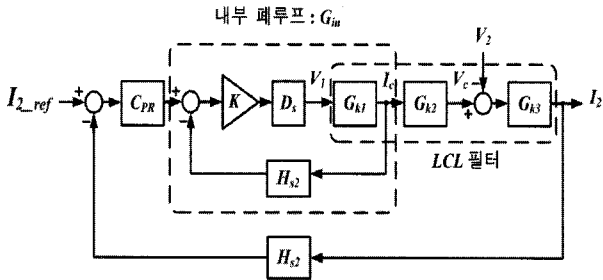


그림 4 공진 억제를 담당하는 내부 루프와 0에 가까운 정상 상태 오차를 달성하는 외부 루프로 구성된 블록 선도

Fig. 4 Block diagram representation of the control system which consists of an inner loop for damping the resonance and an outer loop for nearly zero steady state error

그림 4에 나타난 내부 폐 루프 전달 함수 G_{in} 은 한 쌍의 공진 극점으로 인한 공진을 억제한다^[4]. 비례 이득 K 는 G_{in} 의 안정도를 결정하는데, 주파수 응답 기법을 적용하여 이 값을 합리적으로 결정할 수 있다. 인버터는 double edge asymmetrical regular sampled PWM 방법을 사용한다. 이로 인해 위상 지연이 발생한다. 또한 DSP의 처리 지연(processing delay)으로 인한 위상 지연도 존재한다. 총 위상 지연은 다음과 같다.

$$D_s = \frac{1}{1 + sT_s \times 3/2} \quad (8)$$

여기서 T_s 는 샘플링 시간 간격(sampling interval)을 의미한다. 그림 4에서 C_{PR} 은 정지 좌표계 제어기^[1]이다. 회전 좌표계 PI 제어기와 비례 공진 제어기(Proportional plus Resonant controller)는 동일한 성능을 보이기 때문에^[2], 회전 좌표계 PI 제어기를 사용한 시스템은 정지 좌표계 C_{PR} 제어기를 이용하여 안정도 해석이 가능하다. 전달함수 H_{s2} 는 감쇠비(damping ratio)가 0.7이고 대역폭(bandwidth)이 10kHz인 2차저역 통과 필터이다.

3.1 내부 루프 G_{in} 에 있는 비례 이득 K 선택

Matlab의 명령어인 sisotool 을 이용해서, 이득 K 를 선정할 수 있다. 이득 선정은 주파수 응답 해석을 이

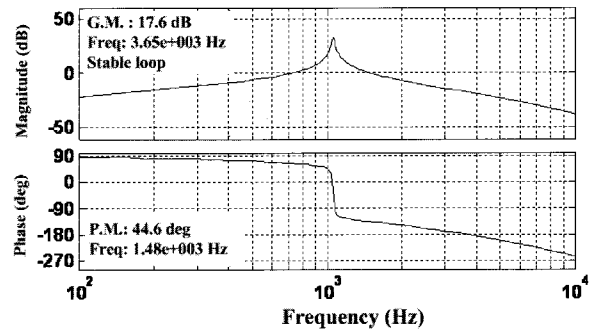


그림 5 내부 루프 G_{in} 에서, $K=25$ 일 때 개 루프 전달 함수 $H_{s2} \cdot K \cdot D_s \cdot G_{k1}$ 의 보드 선도

Fig. 5 Bode diagram of the open loop transfer function $H_{s2} \cdot K \cdot D_s \cdot G_{k1}$ in the inner capacitor current loop when $K=25$

용하여 해석적으로 접근한다. 그림 5를 통해서, K 를 25로 선택하여 17.6dB의 이득 여유(G.M.:gain margin)와 44.6°의 위상 여유(P.M.:phase margin)를 얻는다.

3.2 비례 공진 제어기의 이득 값들 선택

내부 루프 G_{in} 이 공진 억제를 담당하는 반면에, 비례 공진 제어기는 0에 가까운 정상 상태 오차를 유지하게 한다.

$$C_{PR} = k_p + \frac{k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_o^2} \quad (9)$$

여기서 ω_c 는 lower breakpoint frequency라 하며 매우 작은 값이다^[1]. 그리고 $\omega_o = 2\pi \cdot 60$. 식 (9)에서 k_p 는 비례 이득이고 k_r 은 공진 이득이다. 시스템의 안정도는 공진 이득보다 비례 이득의 영향을 더 많이 받기 때문에 비례 이득을 먼저 선택한다. 개 루프 전달 함수 $H_{s2} \cdot k_p \cdot G_{in} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ 의 주파수 응답을 나타내는 그림 6을 통해, $k_p=0.9$ 를 선택하여 7.12dB의 이득 여유를 얻는다. 이어서, 정상 상태 크기와 위상 오차가 작게 될 수 있도록 공진 이득 k_r 을 결정한다. 여기서 k_r 은 회전 좌표계 PI 제어기의 적분 이득 값과 같다. 전달 함수 $H_{s2} \cdot C_{PR} \cdot G_{in} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ 의 주파수 응답을 나타낸 그림 7에서 k_r 의 값으로 적당히 80으로 결정한다. 여기서 공진 이득이 너무 작다면 정상 상태 크기와 위상 오차가 커질 것이다. 반대로 공진 이득이 너무 크다면, 위상 여유 값이 작아져 시스템의 안정도를 장담할 수 없을 것이다. 그림 7에 나타나듯이, 전체 제어 시스템의 이득 여유는 6.95dB 그리고 위상 여유는 49.7°로 상대적

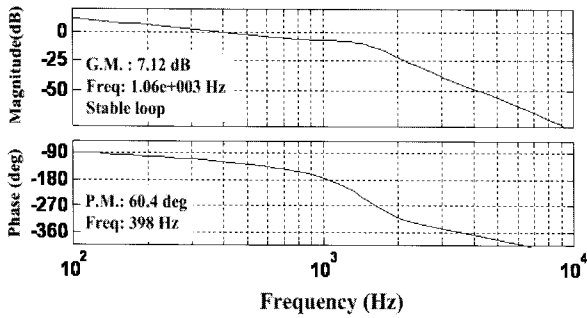


그림 6 $k_p=0.9$ 그리고 $k_r=0$ 일 때 개 루프 전달 함수 $H_{s2} \cdot k_p \cdot G_{i1} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ 의 보드 선도
 Fig. 6 Bode diagram of the open loop transfer function $H_{s2} \cdot k_p \cdot G_{i1} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ when a proportional gain $k_p=0.9$ and $k_r=0$ of the controller C_{PR}

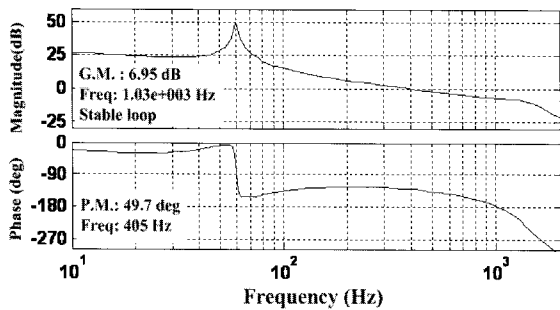


그림 7 $k_p=0.9$ 그리고 $k_r=80$ 일 때 개 루프 전달 함수 $H_{s2} \cdot C_{PR} \cdot G_{i1} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ 의 보드 선도
 Fig. 7 Bode diagram of the open loop transfer function $H_{s2} \cdot C_{PR} \cdot G_{i1} \cdot G_{k2} \cdot G_{k3}$ when a proportional gain $k_p=0.9$ and $k_r=80$ of the controller C_{PR}

으로 안정하다. Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 제어기 설계에도 동일한 과정을 수행할 수 있다. 표 1에 두 시스템에 대한 제어 매개변수 값이 나열되어 있다.

4. 실험 결과

△-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템과 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 각각에서 실험을 진행한 다. 두 시스템의 LCL 필터 값은 동일하다. 모델과 설계한 제어기의 정당성은 실험을 통해 증명한다. 계통 선간 전압의 위상을 추출하기 위해 위상 동기 루프

표 1 △-결선 LCL 필터 그리고 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 각각에 대한 제어 매개변수

Table 1 Control Parameters of the System with a Delta Connected LCL Filter and a Wye Connected LCL Filter

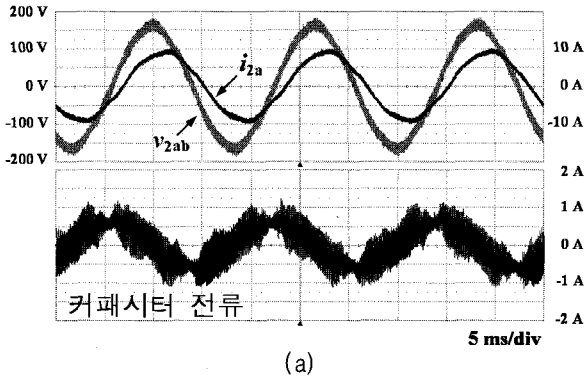
	△-결선 LCL 필터	Y-결선 LCL 필터
내부 비례 이득 K	25	10
식(9)의 비례 이득 k_p	0.9	0.9
식(9)의 공진 이득 k_r	80	80
식(9)의 값 ω_c	5	5

표 2 실험 조건 그리고 필터 값

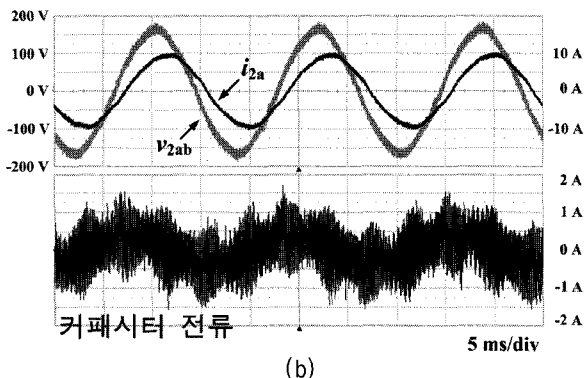
Table 2 Experimental Conditions and Filter Values

시스템 매개변수		LCL 필터 값	
DC 입력 전압	300 V	L_1	1.5 mH
DC link 커패시터	30 mF	L_2	1.5 mH
계통 선간 전압	110 Vrms	C_f	10 μ F
스위칭 주파수	10 kHz		
샘플링 주파수	20 kHz		

(PLL : phase locked loop)를 사용한다^[7]. 실험 조건과 필터 값이 표 2에 나열되어 있다. 그림 8은 △-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템과 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 정상 상태에 대한 실험 파형을 보여준다. 두 실험 모두 계통 선 전류의 최대값 지령치가 9A이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 계통 선간 전압에 비해 계통 선 전류가 30° 뒤지는 걸로 보아, 변위 역률(DPF)이 1에 가깝다는 것을 알 수 있다. 그림 8-(a)에 나타난 커패시터 전류는 그림 8-(b)에 나타난 커패시터 전류보다 좀 더 낮은 수준의 고조파를 함유하고 있다. 두 시스템에서 LCL 필터의 공진을 억제하기 위한 내부 루프에서 제어 변수로 커패시터 전류를 사용한다. 만약 스위칭 주파수가 좀 더 작아지거나 공진 주파수가 커진다면, 커패시터에 포함된 고조파는 기본파 성분보다 더욱 커져서 인버터 제어 신호에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 LCL 필터 값이 동일한 경우 Y-결선 시스템보다 △-결선 시스템이 커패시터 전류의 고조파를 저감하는데 유리하기 때문에, △-결선 LCL 필터를 제어하는 것이 Y-결선 LCL 필터를 제어



(a)

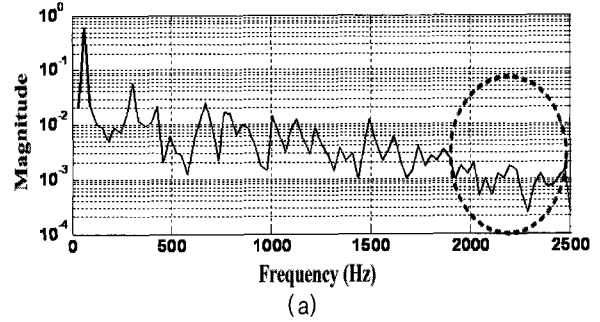


(b)

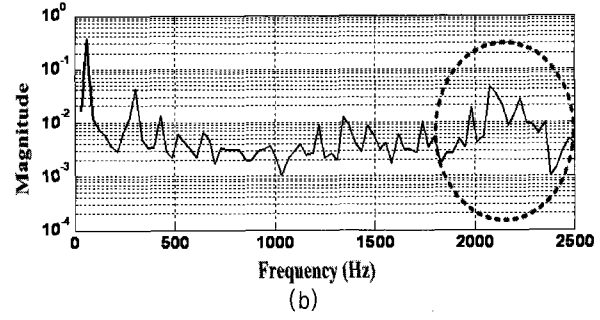
그림 8 (a) Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의, (b)Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 정상 상태에 대한 실험 파형

Fig. 8 Experimental steady state waveforms for systems with (a) a delta connected LCL filter and (b) a wye connected LCL filter

하는 것보다 유리하다. 그림 9-(a)와 그림 9-(b)는 각 시스템의 선 전류를 푸리에 변환을 하여 구한 크기 스펙트럼이다. 그림 9-(a)와 그림 9-(b)에 나타난 크기 스펙트럼에 점선 동그라미가 표시되어 있다. 점선 동그라미의 비교를 통해, 2배의 스위칭 주파수의 측파대에서 Δ -결선 LCL 필터에 흐르는 커패시터 전류는 Y-결선 LCL 필터에 흐르는 커패시터 전류보다 적은 고조파를 함유한다는 것을 알 수 있다. 결국 이 차이가 커패시터 전류의 고조파 함유량의 차이를 불러온다. 만약, 인버터의 스위칭 주파수를 줄이거나 LCL 필터 값을 변경하여 공진 주파수를 크게 했다면, 커패시터 전류는 더욱 많은 고조파를 함유하게 될 것이다. 어떤 경우에는 커패시터 전류의 기본파 성분보다 고조파 성분의 크기가 더욱 커져서 추가적으로 저역 통과 필터를 사용해야 하는 경우가 생길지도 모른다.



(a)



(b)

그림 9 (a) Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의, (b)Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템의 커패시터 전류에 대한 크기 스펙트럼

Fig. 9 Magnitude spectra for capacitor currents in systems with (a) a delta connected LCL filter and (b) a wye connected LCL filter

5. 결론

Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터 시스템의 모델을 제안하였다. 제안한 모델의 타당성을 입증하기 위하여, Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 시스템과 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 시스템 각각에 대한 제어기 설계와 실험을 실행하였다. 모델을 이용한 설계를 이용해 실험한 결과 제안한 Δ -결선 LCL 필터를 사용하는 삼상 계통 연계 인버터의 s-domain 모델은 타당성이 있음을 입증했다. 제어기 설계는 고전 제어 이론에 근거하여 해석적으로 접근하였다. 여기서 제어는 여러 제어 방법 중에서 커패시터 전류를 이용하여 공진을 억제하는 제어 방법을 사용했다. 만약 동일한 LCL 필터 값을 사용하여 LCL 필터를 만든다면, Δ -결선 LCL 필터를 이용하는 것이 Y-결선 LCL 필터를 사용하는 것보다 위 언급한 제어를 하는데 유리하다. 이에 대한 근거는 두 시스템의 실험 결과인 커패시터 전류를 푸리에 해석한 크기 스펙트럼이다.

본 연구는 산업자원부 전력 IT사업 중 “분산발전 및 산업용 인버터 응용을 위한 전력반도체 기술개발”의 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] D.N. Zmood and D.G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 3, pp. 814-822, 2003.
- [2] D.N. Zmood, D.G. Holmes and G.H. Bode, "Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 37, No. 2, pp. 601-610, 2001.
- [3] V. Blasko and V. Kaura, "A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 2, pp. 542-550, 1997.
- [4] N. Abdel-Rahim and J.E. Quaicoe, "Modeling and analysis of a feedback control strategy for three-phase voltage-source utility interface systems," in *Proc. 29th IAS Annu. Meeting*, 1994, pp. 895-902.
- [5] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL filter based three-phase active rectifier," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1281-1291, 2005
- [6] E. Twining and D. G. Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 3, pp. 888-895, 2003.
- [7] Chung, S.-K, "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems," *IEE Proc. Electr., Power Appl.*, Vol. 147, No. 3, pp. 213-219, 2000.

저 자 소 개



이상인(李相仁)

1981년 3월 14일생. 2007년 한양대 전자전기컴퓨터 공학부 졸업. 2007년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정.



이귀준(李貴俊)

1979년 7월 19일생. 2005년 한양대 전자전기컴퓨터 공학부 졸업. 2005년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도 대학 교환교수. 1988년~1989년 원헨 공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전기제어생체공학부 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.