

# 인덕턴스 변화에 강인한 계통연계형 인버터의 복소 벡터 전류제어기

## Complex Vector Current Control of Grid Connected Inverter Robust for Inductance Variation

이 태 진\* · 조 종 민\* · 신 창 훈\* · 차 한 주\*  
(Taejin Lee · Jongmin Jo · Changhoon Shin · Hanju Cha)

**Abstract** - This paper analyzes complex vector current control for the enhanced cross-coupling compensation in accordance with parameter variation in grid-connected inverter system, and verifies through simulation and experiment. Complex vector current control is performed in the synchronous reference frame through d-q transformation. It generates cross-coupling components with rotating nominal angular frequency. In general, cross-coupling elements are compensated by decoupling terms added to output of conventional decoupling PI controller. But, it is impossible to compensate them perfectly which transient response is especially deteriorated such as large overshoot and slow tracking, when variation of grid impedance or measurement error occurs. However, complex vector current control can improve stability and response characteristic of current control regardless of the situation as before. Decoupling controller and complex vector controller are represented through complex forms, and these controllers are analyzed by using frequency response in s-domain, respectively. It is verified that complex vector controller has more superior response characteristic than decoupling controller through MATLAB, PSIM and experimental in 5kW grid-connected inverter when L filter parameter is varied from 1.1mH to increase double, 2.2mH.

**Key Words** : Cross-coupling, Complex vector PI current controller, Parameter variation, Grid-connected

### 1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화, 화석연료 그리고 환경오염에 대한 우려로 친환경 에너지의 연구 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 이런 가운데 태양광 에너지, 풍력 발전 그리고 연료전지가 주목받고 있다. 이러한 신재생 에너지는 인버터를 통해 배터리 에너지 저장 장치, 수용가 또는 한전 계통에 전류제어를 통해 공급한다. 전류제어는 전체 시스템 안정도 및 전력 품질이 결정될 수 있는 중요한 부분이며, 일반적으로 계통연계형 인버터는 동기좌표계 축에서 PI 제어를 이용하여 전류제어를 수행한다. hysteresis 제어, predictive 제어 그리고 direct power 제어와 같은 여러 기법들이 존재하며 각각의 장점을 가지고 있지만, PI 제어 기법은 구현이 쉽고, 안정적이기 때문에 현재 산업사회에서 많이 사용되고 있다.[1-5] 계통연계형 인버터 PI 전류제어는 3상 좌표계의 교류 성분을 축 변환을 통해 동기좌표계에서의 직류 성분으로 표현되는 d-q축을 이용하여 제어를 수행한다. 이상적인 경우 d-q축이 각각 독립적으로 제어 수행을 하지만, 계통의 임피

던스 또는 필터 인덕터의 측정 오차 및 에이징 효과로 인한 파라미터가 불확실성, 인버터와 계통 사이에 존재하는 변압기의 누설 인덕턴스로 인하여 정확한 인덕턴스의 값을 알 수 없다. 또한 분산전원에 적용되는 계통연계형 인버터는 PCC지점에 여러 유도성 부하가 추가됨으로써 인덕턴스의 불확실성이 커지게 된다.

불확실성에 의해 발생하는 오차는 d-q축에 서로 상호 간섭 성분이 존재하게 되며, 제어기의 동특성 및 성능 저하의 원인이 된다. 또한 상호 간섭 성분은 주파수가 증가함에 따라 임피던스가 비례적으로 커지기 때문에 큰 오차를 야기한다. 따라서 동기좌표계 PI 전류제어를 안정적으로 수행하기 위해서는 상호 간섭 성분을 적절하게 보상해야 한다. 하지만, 상호 간섭 성분을 고려하여 d-q에 대한 PI 전류제어기는 다중 입·출력 구조로서 해석 및 설계에 어려움이 존재하여, 해석 및 설계에 편리성을 위해서 단일 입·출력 구조인 복소수 형태로 나타낸다.[6-8] 또한 각 제어기의 특성을 정확하게 해석하기 위해서 정지좌표계에서 해석한다.[9-11]

본 논문에서는 그림 1에 표현된 계통연계형 인버터 블록도를 기반으로 실험을 진행하였으며, 해석 및 제어기 이득 설정을 위해서 필터의 인덕턴스와 내부저항을 고려하였으며, 표 1은 계통연계형 시스템에 적용한 파라미터를 나타낸다. MATLAB/SIMULINK를 이용하여 상호 간섭 성분이 포함된 동기좌표계 PI 전류제어기와 상호 간섭 성분을 보상할 수 있는 디커플링 PI 전류제어기와 복소 벡터 PI 전류제어기의 주파수 응답 특성 및 단

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea.  
E-mail : hjcha@cnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea.

Received : June 1, 2016; Accepted : September 13, 2016

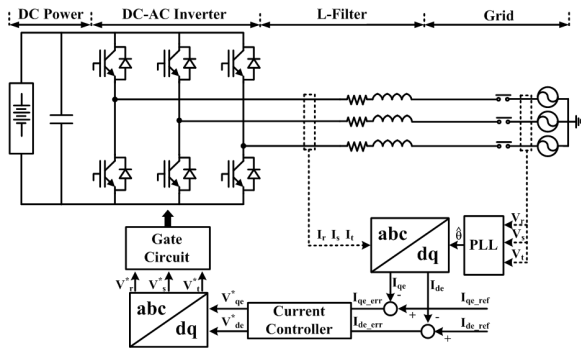


그림 1 계통연계형 인버터의 구성  
 Fig. 1 Configuration of grid-connected inverter

표 1 시스템 파라미터  
 Table 1 System Parameter

시스템 파라미터	
용량(P)	5kW
DC Link( $V_{dc}$ )	500V
계통 전압( $V_g$ )	220V <sub>rms</sub>
인덕턴스(L)	1.1mH
저항(R)	0.03Ω

위 응답 특성을 나타낸다. 동기좌표계 PI 전류제어기 해석은 각 0Hz, 60Hz, 100Hz에서 나타나는 특성을 확인하며, 60Hz 계통주파수에서 인덕턴스 변화에 따른 디커플링 PI 전류제어기와 복소 벡터 PI 전류제어기에 대한 특성을 확인한다. 마지막으로 5kW 계통연계형 실험을 통해 인덕턴스 값의 오차가 발생한 경우 상호 간섭 성분을 보상하는 두 제어기의 응답 특성을 확인한다.

## 2. 단일 입·출력 동기좌표계 PI 전류제어기

동기좌표계에서 PI 전류제어기를 해석할 때 d축과 q축을 각각 표현한 스칼라 형태는 다중 입·출력 구조로 구성되어 있기 때문에 플랜트가 인덕턴스 기반의 모델인 경우 발생하는 상호 간섭 성분을 고려하여 설계 및 해석이 복잡하다. 본 논문에서는 이러한 복잡성을 해결하기 위해서 복소수 형태의 단일 입·출력 구조로 표현하여 주파수 응답 특성을 통해 제어기의 응답 특성을 분석한다. 단일 입·출력 구조로 표현되는 제어기 구조는 그림 2와 같이 표현되며, 복소평면에서 직각좌표 및 극좌표 형식으로 식 (1)과 같이 나타낸다. 여기서  $F = |f_{dq}|$ 이고,  $\theta = \tan^{-1}(f_q/f_d)$ 을 의미한다.

$$f_{dq} = f_d + jf_q = Fe^{j\theta} \quad (1)$$

계통연계형 인버터 전류제어 수행에 L필터를 사용하였으며, 제어기 성능해석을 위하여 필터의 인덕턴스와 내부저항을 고려하여

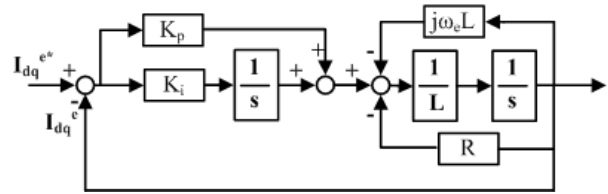


그림 2 동기좌표계 일반적인 PI 전류제어기 블록도  
 Fig. 2 Block diagram of classical PI current controller in synchronous reference frame

플랜트를 적용하였다. 제어기 이득산정은 극점-영점 상쇄 기법 ( $R/L = k_i/k_p$ )을 이용하여 산정하였다. 식 (2)는 인버터 출력 상전압, 필드, 계통 전압을 고려하여 동기좌표계 d-q 축에서 표현하였으며, d축에는 q축 성분에 해당하는  $-\omega_c L$ 이 존재하고, q축에는 d축 성분에 해당하는  $\omega_c L$ 이 존재한다. d-q 축에서 서로 존재하는 상호 간섭 성분은 제어 성능을 저하시키는 원인이므로 동기좌표계에서 사용되는 PI 전류제어기는 플랜트가 인덕턴스 기반의 모델인 경우 상호 간섭 성분을 적절하게 보상해야 한다.

$$\begin{aligned} v_d^e &= Lp i_d^e + R i_d^e - \omega_c L i_q^e + e_d^e \\ v_q^e &= Lp i_q^e + R i_q^e + \omega_c L i_d^e + e_q^e \end{aligned} \quad (2)$$

단일 입·출력 구조로 표현하기 위해서 식 (2)를 식 (3)과 같이 나타내며, 라플라스 변환을 통해 입·출력 관계에 대해서 식 (4)로 표현한다.

$$v_{dq}^e = Lp i_{dq}^e + R i_{dq}^e + j\omega_c L i_{dq}^e + e_{dq}^e \quad (3)$$

$$\frac{i_{dq}^e}{v_{dq}^e} = \frac{1}{Ls + R + j\omega_c L} \quad (4)$$

### 2.1 동기좌표계 PI 전류제어기 해석

그림 2는 일반적인 동기좌표계에서 PI 전류제어기로서, d-q 축에 존재하는 상호 간섭 성분을 보상하지 않는다. 그림 3은 그림 1의 전달함수에 대해서 주파수 응답 특성을 확인하며 주파수 증가에 따라 나타나는 특성을 확인하기 위해 0, 60, 100Hz에 대해서 나타내며 정확한 비교를 위해 정지좌표계에서 표현한다.

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (5)$$

식 (5)는 동기좌표계 PI 전류제어기 전달함수이며, 식 (6)에 대입함으로써 식 (7)과 같이 정리된다.

식 (6)에서  $s - j\omega_c$ 는 정상분을 의미하고,  $s + j\omega_c$ 는 역상분을 의미한다. 역상분은 단락 사고나 지락 사고에 의해 불평형이 발생했을 때 고려되는 성분으로써 본 논문에서는 3상 성분을 평형 상태로 가정하기 때문에 정상분만을 고려하여 해석한다.

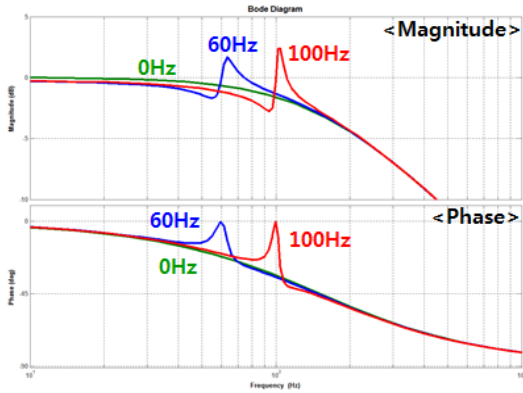


그림 3 계통연계형에 적용되는 일반적인 PI 전류제어기 주파수 응답특성

Fig. 3 Frequency response of classical PI current controller in grid-connected, shown in the stationary reference frame

$$G_{PR}(s) = \frac{1}{2}(G_{PI}(s - j\omega_e) + G_{PI}(s + j\omega_e)) \quad (6)$$

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega_c^2} \quad (7)$$

정상분만을 고려한 정지좌표계에서 PI 전류제어기 페루프 전달함수는 식 (8)과 같이 나타낸다. 주파수가 0Hz인 경우 상호 간섭 성분이 존재하지 않지만, 60Hz인 경우 상호 간섭 성분에 의한 오차가 발생하여 오버슈트가 발생하고, 100Hz에서는 60Hz 경우보다 큰 오버슈트가 발생한다.

$$\frac{i_{dq}^s}{i_{dq}^{s*}} = \frac{k_p s + k_i - jk_p \omega_e}{Ls^2 + (k_p + R - j\omega_e L)s + k_i - j\omega_e (k_p + R)} \quad (8)$$

그림 2에서 표현한 동기좌표계 PI 전류제어기의 단위 응답 특성을 그림 4에서 나타내며 인버터 스위칭 단락 방지를 하기 위한 데드타임을 반영하였으며, 이로 인해 d-q축 전류에 6고조파 성분의 리플이 나타남을 볼 수 있다. 1초에 d-q축에 대한 지령치는 각각 -10A, -18.5A를 적용하며, 400ms 후에 d축을 10A로 변동시킴에 따라, d-q 축의 응답특성을 확인한다. 그림 (a)는 주파수가 60Hz 일 때 단위 응답 특성을 나타내며, 초기에 d축에 -11.8A의 언더슈트가 발생하고, 400ms 후에 d축의 변동에 따라 q축에 영향을 끼쳐 -22A의 언더슈트가 나타난다. 그림(b)는 주파수가 100Hz일 때 단위 응답 특성을 나타내며, 초기에 d축은 -13A에 해당하는 언더슈트가 발생하고, 1.4s에 d축을 변동시킨 경우, q축에 -24A의 언더슈트가 나타나며, 60Hz의 경우보다 긴 정착시간이 걸린다. 식 (3)에서  $\omega_e L$ 은 상호 간섭 성분으로써 주파수에 따라 비례적으로 증가하여 오차가 커지게 되며, 제어기의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 그러므로 d-q축에 각각 상호 간섭 성분에 대해서 적절하게 보상이 필요하다.

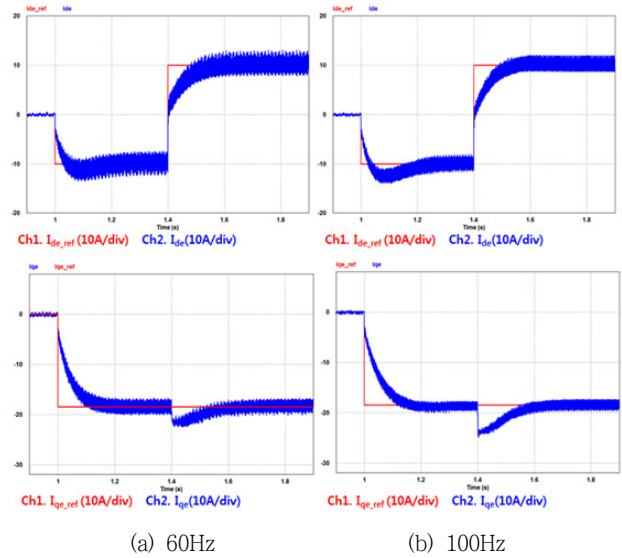


그림 4 계통연계형에 적용되는 일반적인 PI 전류제어기 단위 응답 특성 (a) 60Hz, (b) 100Hz

Fig. 4 Step response of classical PI current controller in grid-connected inverter (a) 60Hz, (b) 100Hz

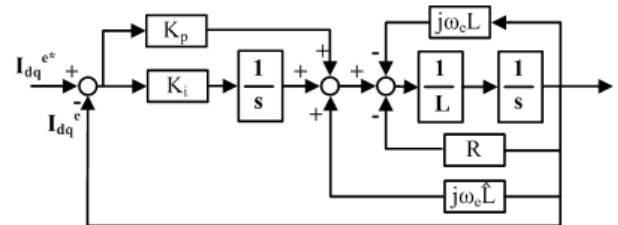


그림 5 동기좌표계 디커플링 PI 전류제어기 블록도  
Fig. 5 Block diagram of decoupling PI current controller in synchronous reference frame

### 3. 동기좌표계 디커플링 PI 전류제어기

2.1절에서 언급한 동기좌표계 PI 전류제어기는 상호 간섭 성분에 의해서 오차가 발생하고, 주파수 커짐에 따라 비례적으로 오차가 증가하는 것을 확인했다. 오차를 제거하기 위해서는 적절하게 상호 간섭 성분에 대해서 보상이 필요하다. 그림 5는 디커플링 PI 전류제어기 구조이며 식 (9)와 같이 동기좌표계 플랜트에서 발생하는 상호 간섭 성분( $\omega L$ )에 대해서 제어기 출력에 ( $\omega \hat{L}$ ) 성분을 보상해줌으로써 제어기 극점과 플랜트의 영점을 상쇄시키는 기법이다. 하지만, 인덕턴스의 불확실성이 존재하는 경우 ( $L \neq \hat{L}$ ) 보상 성분( $\omega \hat{L}$ )이 상호 간섭 성분을 적절하게 제거할 수 없으므로 발생한 오차는 PI제어기의 적분기가 부담하게 되어 제어기의 동특성 및 성능 저하를 초래하게 된다.

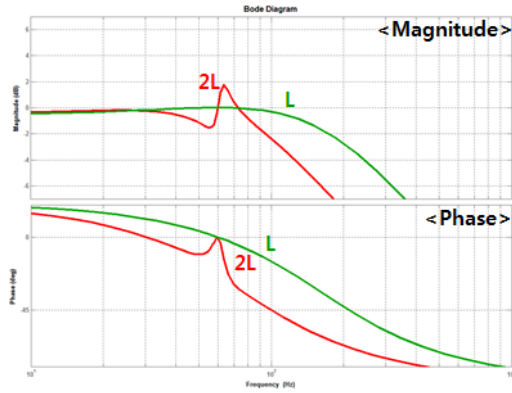


그림 6 계통연계형에 적용되는 디커플링 PI 전류제어기 주파수 응답 특성

Fig. 6 Frequency response of decoupling PI current controller in grid-connected, shown in the stationary reference frame

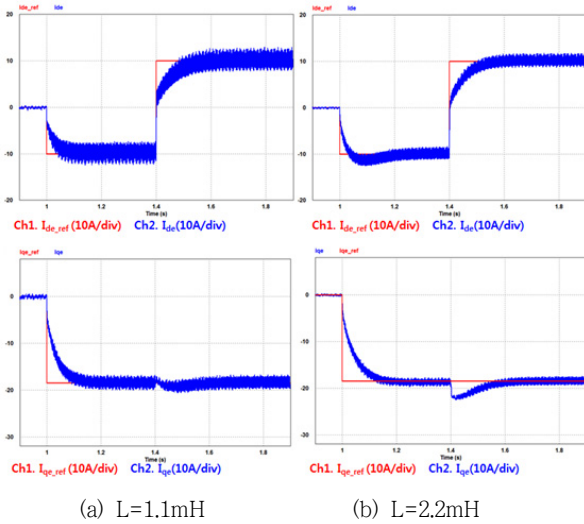


그림 7 계통연계형에 적용되는 디커플링 PI 전류제어기 단위 응답 특성

Fig. 7 Step response of decoupling PI current controller in grid-connected inverter

$$Open\ loop = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) \times \left( \frac{1}{Ls + R + j\omega L - j\omega \hat{L}} \right) \quad (9)$$

그림 6은 디커플링 PI 전류제어기의 주파수 응답 특성이며, 정확한 비교를 위해 디커플링 PI 전류제어기를 정지좌표계에서 표현한 식 (10)을 이용하여 60Hz에서 상호 간섭 성분을 정확하게 보상한 경우와 2배의 인덕턴스가 증가한 경우에 대해서 나타낸다.

$$\frac{\hat{i}_{dq}^s}{\hat{i}_{dq}^{s*}} = \frac{k_p s + k_i - jk_p \omega_e}{Ls^2 + (k_p + R - j\omega_e(L + \hat{L}))s + k_i - \omega_e^2 \hat{L} - j\omega_e(k_p + R)} \quad (10)$$

상호 간섭 성분을 정확히 보상한 경우 60Hz에서 오버슈트 없이 크기가 0dB를 갖으며 안정적인 제어 수행이 가능하지만, 인덕턴스가 2배로 증가한 경우, 60Hz 구간에서 오버슈트가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 60Hz 계통 주파수에서 디커플링 PI 전류제어기의 단위 응답 특성을 나타내며, 상호 간섭 성분 보상 여부에 따른 특성을 확인한다. (a)는 필터 인덕턴스 1.1mH, (b)는 2.2mH의 조건이며, 1.1mH에 해당하는 성분만 제어기 출력에 보상하였다. (a)는 d-q축의 각각의 단위 변화에 따라 오버슈트 없이 정상상태에 도달하지만, (b)는 상호 간섭 성분에 대해서 정확히 보상이 되지 않았기 때문에 오버슈트가 발생하며, (a)의 동특성에 비해 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 동기좌표계 복소 벡터 PI 전류제어기

그림 8은 동기좌표계 복소 벡터 PI 전류제어기를 나타내며 제어기의 적분기에서 상호 간섭 성분을 보상하는 방식이다. 식 (11)은 복소 벡터 PI 전류제어기의 개루프 전달함수를 나타내며, 적분기에  $j\omega k_p$ 를 보상함으로써 상호간섭 성분이 제거되는 방식이

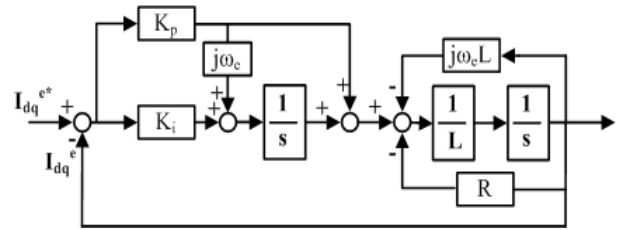


그림 8 동기좌표계 복소 벡터 PI 전류제어기 블록도

Fig. 8 Block diagram of complex vector PI current controller in synchronous reference frame

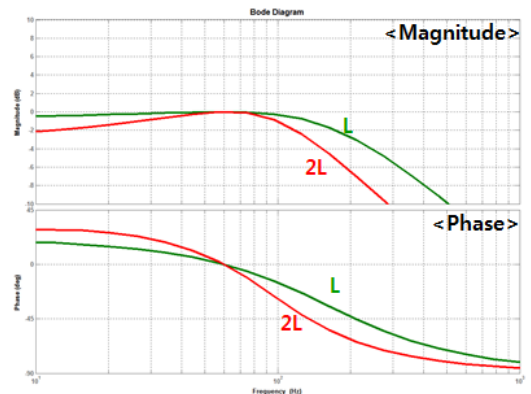


그림 9 계통연계형에 적용되는 복소 벡터 PI 전류제어기 주파수 응답 특성

Fig. 9 Frequency response of complex vector PI current controller in grid-connected, shown in the stationary reference frame

다. 디커플링 PI 전류제어기는 파라미터의 정확성이 요구되지만, 복소 벡터 PI 전류제어기는 파라미터의 오차로 발생한 d-q 축 각각에 존재하는 상호 간섭 성분을 적분기에서 보상함으로써 안정적인 제어 수행이 가능하다. 또한 적분기에 보상 성분에 해당하는 이득을 더해줌으로써 디커플링 PI 전류제어기보다 빠른 응답 특성을 나타낸다.

$$Openloop = \left( k_p + \frac{k_i + j\omega k_p}{s} \right) \times \left( \frac{1}{Ls + R + j\omega L} \right) \quad (11)$$

그림 9는 복소 벡터 PI 전류제어기의 주파수 응답 특성이며, 정확한 비교를 위해 복소 벡터 PI 전류제어기를 정지좌표계에서 표현한 식 (12)을 이용하여 계통주파수 60Hz에서 디커플링 전류제어기 조건과 동일하게 적용하였다. 디커플링 PI 전류제어기와 달리 인덕턴스의 오차가 발생한 경우에도 오버슈트 없이 60Hz영역에서 안정적인 제어 수행이 가능한 것을 알 수 있다.

$$\frac{\dot{i}_{dq}^s}{i_{dq}^{s*}} = \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + (k_p + R - j\omega_c L)s + k_i - j\omega_c R} \quad (12)$$

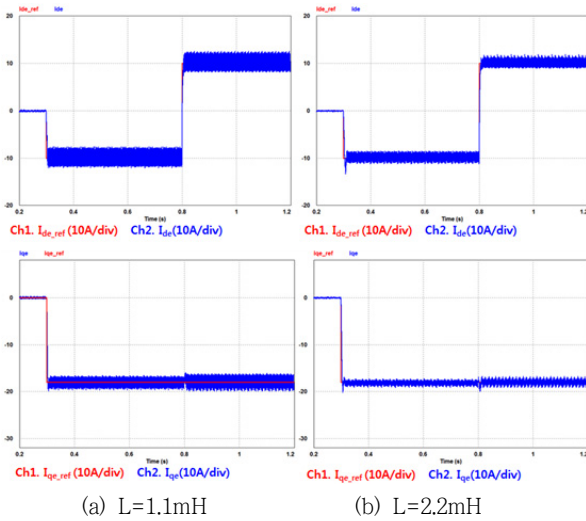


그림 10 계통연계형에 적용되는 복소 벡터 PI 전류제어기 단위 응답 특성

Fig. 10 Step response of complex vector PI current controller in grid-connected inverter

그림 10은 60Hz 계통 주파수에서 복소 벡터 PI 전류제어기의 필터 인덕턴스 변화에 따른 단위 응답 특성을 나타내며, (a)는 필터 인덕턴스 1.1mH, (b)는 2.2mH의 경우이다. 디커플링 PI 전류제어기와 다르게 두 가지 조건의 경우 모두 안정적인 제어 수행을 하기 때문에, 인덕턴스의 오차에 강인한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 복소 벡터 PI 전류제어기는 인덕턴스의 불확실성으로 제어기의 영점과 플랜트의 극점이 상쇄되지 않을 경우에도 제어기의 적분기에 간섭 성분을 미리 보상함으로써 디커플링 PI 전류제어기에 비해 우수한 동특성을 갖는다.

### 5. 실험 결과

본 그림 11은 계통연계형 인버터 시스템으로써, 표 1에 나타난 파라미터 값을 이용하였으며, 주파수 응답 특성 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험을 진행했다. 계통전압은 220V<sub>rms</sub>, DC Link 전압은 500V, 그리고 필터 인덕턴스의 값은 1.1mH, 2.2mH이며, 실험에서는 인버터의 스위칭 단락을 위한 데드타임과 실제 계통 전압에 존재하는 고조파 성분의 영향으로 d-q축 전류에 리플이 발생함을 볼 수 있다. 단위 응답 특성은 시뮬레이션과 동일한 조건으로 초기에 d축 전류 -10A, q축 전류 -18.5A의 지령치를 적용하였으며, 400ms 후에 d축 전류의 지령치를 10A로 단위 변화시키는 실험을 진행하였으며, 이를 통해 제어기의 동특성을 확인하였다.

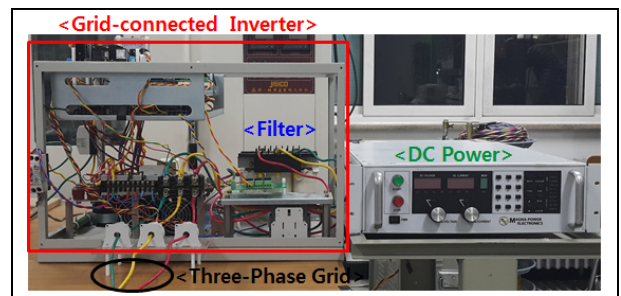


그림 11 계통연계형 인버터 실험시스템 구성  
Fig. 11 Configuration of grid-connected inverter experiment system

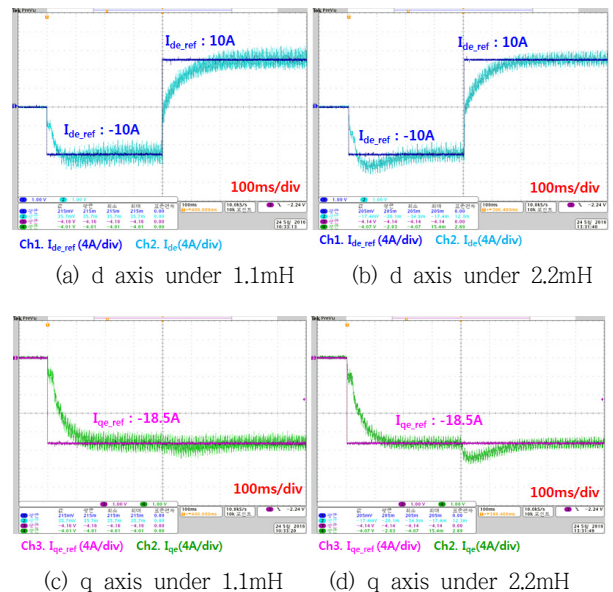
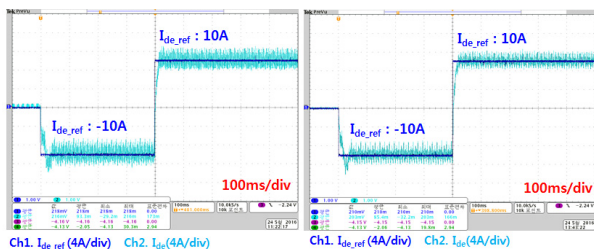


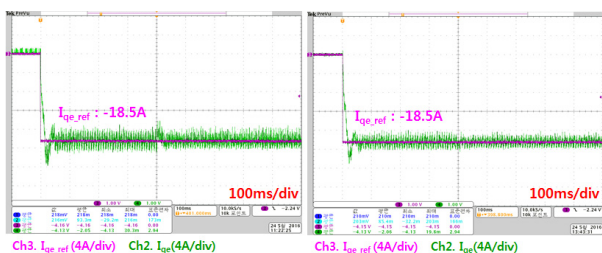
그림 12 계통연계형에 적용되는 디커플링 PI 전류제어기 단위 응답 실험 결과

Fig. 12 Step response of Decoupling PI current control in grid-connected experiment

그림 12는 디커플링 PI 전류제어기를 이용한 계통연계형 실험 결과를 나타내며, 상호 간섭 성분에 대해서 1.1mH에 해당하는 값만을 보상한다. 필터 인덕턴스가 1.1mH인 경우 상호 간섭 성분을 정확히 보상하기 때문에 d-q축 전류는 안정적인 제어 수행의 결과를 확인할 수 있으며, 필터 인덕턴스가 2.2mH인 경우 오차가 발생하여 정확하게 간섭 성분을 보상할 수 없기 때문에 초기 지령치에 따라 d축은 -12.1A의 언더슈트가 발생하며, 400ms 뒤에 d축 변동시킨 경우에 q축은 -21.5A의 언더슈트가 발생하며 응답 속도도 느려지는 것을 실험을 통해 검증하였다.



(a) d axis under 1.1mH      (b) d axis under 2.2mH



(c) q axis under 1.1mH      (d) q axis under 2.2mH

그림 13 계통연계형에 적용되는 복소 벡터 PI전류제어기 단위 응답 실험 결과

Fig. 13 Step response of Complex Vector PI current control in grid-connected experiment

그림 13은 복소 벡터 PI 전류제어기를 이용한 계통연계형 실험 결과를 나타낸다. 필터 인덕턴스가 1.1mH인 경우 제어기의 영점과 플랜트의 극점이 상쇄되므로 d-q축의 상호 간섭 없이 안정적인 전류제어 수행을 확인할 수 있으며, 인덕턴스 값이 2.2mH인 경우에는 적분기에 보상 성분을 미리 보상함으로써 1.1mH 경우와 거의 동일한 특성을 실험을 통해 확인하였다.

## 6. 결 론

계통연계형 인버터에서 PI 전류제어 수행을 위해서는 필터 인덕턴스에 의해 발생하는 d-q축 상호 간섭 성분의 보상이 요구된다. 본 논문에서는 일반적으로 제어기 출력에 상호 간섭 성분을 보상해주는 디커플링 PI 전류제어 방식과 제어기 적분기 내에 간섭 성분을 보상해주는 복소 벡터 PI 전류제어 방식을 비교하였다. 디커플링 PI 전류제어기는 계통의 임피던스 변화나 필터 인

덕턴스의 측정 오차로 인해 인덕턴스의 값이 불확실한 경우 적분기가 오차를 부담하게 되어 제어 성능이 저하되지만, 복소 벡터 PI 전류제어기는 적분기내에 간섭 성분을 미리 보상해줌으로써 적분기의 부담을 줄일 수 있기 때문에 디커플링 PI전류제어기에 비해 우수한 동특성을 나타낸다. 필터 인덕턴스가 1.1mH, 2.2mH인 경우에 대해서 MATLAB과 PSIM을 이용하여 두 제어기의 주파수 응답 특성 및 단위 응답을 확인하였으며, 5kW 계통연계형 실험을 통해 인덕턴스 오차에 대해서 복소 벡터 PI 전류제어기가 강한 특성을 갖는 것을 검증하였다.

### 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

### References

- [1] Sizhan Zhou, Jinjun Liu, Linyuan Zhou, Hongwei she, "Cross-coupling and Decoupling Techniques in the Cuurent Control of Grid-connected Voltage Source Converter", Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), pp. 2821-2827, March 2015
- [2] Sizhan Zhou, Jinjun Liu, Yan Zhang, "A Decoupling Method based on Reference Current Feedforward for DQ-Frame PI Current Contorl of Grid-Connected Voltage Source Converters." Future Energy Electronics Conference, pp. 1-6. Nov. 2015
- [3] Ui-Seong, Seon-Hwan Hwang, "A Study on Current Ripple Reduction Due to Offset Error and Dead-time Effect of Single-phase Grid-connected Inverters Based on PR Controller." The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol 20, No 3, June 2015
- [4] Kyung-Pil Ahn, Youngll Lee, "Robust Control of a Grid Connected Three-Phase Two-Level Photovoltaic Inverter." The Transactions of the Korean Institue of Power Electronics, Vol 19, No 6, December 2014
- [5] Tuomas Messo, Aapo Aapro, Teuvo Suntio,"Generalized Multivariable small-signal model of three-phase grid-connected inverter in DQ-domain." 2015 IEEE 16th Workshop on Contorl and Modeling for Power Elec-tronics, pp. 1-8, July 2015
- [6] Shen Zhang, Runrui Guo, Kang Li, "Modeling and Design of Matrix Converter Based Unfied Power Flow controller with Implementation of Complex Veector Synchronous Frame PI Current Regulators," Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference, pp. 1619-1623, Oct. 2013
- [7] Fernando Briz, Michael W. Degner, Robert D. Lorenz,

"Analysis and Design of Current Regulators using Complex vectors," Industry Applications IEEE Transactions, Vol. 36, No. 3, pp. 817-825 May/June 2000

- [8] Si, Baojun, Alkhouli, Osama, "Current Regulation in Complex Vector Notation," Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC), 2012 7th International, pp. 997-1003, June 2012
- [9] Ke Dai, Peiguo Liu, Jian Xiong, and Jian Chen "Comparative Study on Current control for Three-Phase SVPWM Voltage-Source Converter in Synchronous Rotating Frame Using Complex Vector Method," Power Electronics Specialist Conference, 2003 PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual pp. 695-700, June 2003
- [10] Jae-Won George Hwang, Manfred Winkelkemper, Peter W. Lehn "Design of an Optimal Stationary Frame Controller for Grid Connected AC-DC Converters," IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference, pp. 167-172, Nov. 2006.
- [11] Daniel Nahum Zmood, Donald Grahame Holmes, Gerwich H. Bode, "Frequency-Domain Analysis of Three-Phase Linear Current Regulators," Industry Applications IEEE Transactions, Vol. 37, No. 2, pp. 601-610, Mar/Apr 2001



**신 창 훈 (Changhoon Shin)**

1992년 경북대 전자공학과 졸업. 1994년 경북대 전자공학과 졸업(석사). 1994년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.



**차 한 주 (Hanju Cha)**

1988년 서울대 전기공학과 졸업, 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사), 2004년 미국 Texas A&M University, College station (공박), 1990년~2001년 LG산전연구소 책임연구원, 2004년 미국 United Technology Research Center 방문교수, 2005년~현재 충남대학교 전기공학과 교수.

저 자 소 개



**이 태 진 (Taejin Lee)**

1990년 2월 27일생, 2014년 한밭대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.  
-관심분야 : ESS, DC-AC 인버터, 고성능 전류제어, PLL



**조 종 민 (Jongmin Jo)**

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 충남대 대학원 전기공학과 박사과정.  
-관심분야 : 독립형/계통연계형 마이크로 그리드, DC-AC 인버터, 전력품질 제어.