

# DQ 변환을 이용한 양방향 인버터의 소신호 모델 및 이중 제어기 설계

김환용, 지상근, 한상규, 홍성수  
국민대학교 전력전자 연구소

## Small Signal Model and Accurate Two-loop Controller Design for Bi-directional Inverter Using DQ Transformation

Hwan Yong Kim, Sang Keun Ji, Sang Kyoo Han, Sung Soo Hong  
Kookmin University Power Electronics Center

### ABSTRACT

본 논문은 Bi directional Inverter(BDI)에 DQ 변환을 적용한 소신호 등가 모델과 이중 루프 제어기 설계에 대해 제안한다. 일반적으로 외부루프의 경우 동적 특성이 매우 느리기 때문에 외부루프 전달함수를 고려하지 않고 설계하는 경우가 많다. 결과적으로 시스템의 안정성이나 동적 특성이 설계한 것과 다르게 나타날 수 있다. 따라서 원하는 특성을 만족하기 위해 실험적 시행착오를 거쳐 설계를 하게 된다. 본 논문에서는 정확한 소신호 등가 모델을 제시하고 제어기를 설계한다. 제안된 방식은 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 회로해석과 소신호 등가 모델의 타당성 및 제어기 설계의 타당성을 증명하였다.

### 1. 서론

최근 들어 에너지 저장 장치를 가지는 계통 연계형 발전시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 그로 인해 단방향 인버터가 아닌 에너지 저장 장치와 계통 사이에서 에너지를 주고 받을 수 있는 BDI에 대해 많이 연구되고 있다.

지금까지 인버터의 제어기 설계 및 분석은 많은 논문에 의해 연구되어 왔다.<sup>[1]</sup> 그러나 DQ 변환을 이용한 모델링의 경우 제어 출력 전달함수에 대한 해석이 충분하지 않다. 또한 BDI의 경우 인버터 모드만 있는 것이 아니라 power factor correction(PFC) 모드도 있기 때문에 두 가지 경우를 모두 고려해서 설계를 해야 한다.

본 논문은 BDI에 DQ 변환을 적용한 소신호 등가모델과 이중루프 제어기 설계에 필요한 제어 출력 전달함수에 대해 제안하며, 제안된 방식은 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통해 회로 해석과 소신호 등가모델의 타당성 및 제어기 설계의 타당성을 증명하였다.

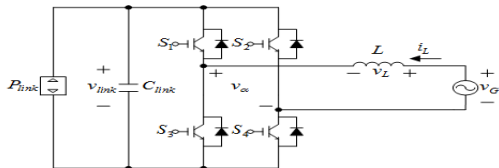


그림 1 계통연계형 양방향 인버터

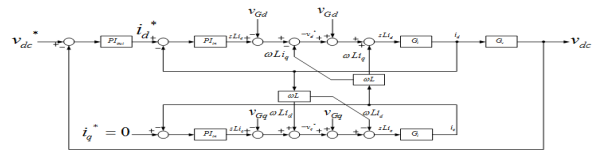


그림 2 DQ 변환을 사용한 BDI의 제어블록도

### 2. BDI의 소신호 모델 및 페루프 제어 설계

#### 2.1 DQ 좌표 변환을 이용한 모델링

그림 1은 계통 연계형 BDI를 나타낸다. 시스템의 모델링을 위해 스위칭 소자는 이상적이며 스위칭으로 인한 고조파 성분은 기본파에 영향을 주지 않고, 인덕터의 저항과 선의 저항은 없다고 가정하였다.

이와 같이 가정하였을 때 그림 1에서 인덕터의 전압수식은 식(1)~(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{G\alpha} = L \frac{di_{L\alpha}}{dt} + v_{\alpha} \quad (1)$$

$$v_{G\beta} = L \frac{di_{L\beta}}{dt} + v_{\beta} \quad (2)$$

이 때의  $i_{L\alpha}$ ,  $i_{L\beta}$ ,  $v_{G\alpha}$ 와  $v_{G\beta}$ 는 각각 실제 인덕터 전류, 가상 인덕터 전류, 실제 계통 전압, 가상 계통 전압을 나타낸다.

식(1)과 식(2)를 DQ 좌표 변환을 한 후, 전류제어기를 포함하면 식(3), 식(4)처럼 나타낼 수 있다.

$$v_d^* = v_{Gd} + \omega L i_q - \left( K_P + \frac{K_I}{s} \right) (i_d^* - i_d) \quad (3)$$

$$v_q^* = v_{Gq} - \omega L i_d - \left( K_P + \frac{K_I}{s} \right) (i_q^* - i_q) \quad (4)$$

식(3), 식(4), 전압제어기와 전향보상을 포함한 BDI의 제어블록도는 그림 2로 나타낼 수 있다.<sup>[2]</sup>

#### 2.2 BDI의 소신호 모델

그림 2의 소신호 모델은 전향보상 및 상호 간섭 성분들을 포함하게 되어 매우 복잡하게 된다. 이를 제어기 설계의 편의를 위해 간략화 하면 그림 3처럼 나타낼 수 있다.

제어기 설계에 필요한 전달함수를 구하기 위해 입출력 파워 평형 방정식을 이용하면 BDI의 소신호 방정식을 구할 수 있다.<sup>[3]</sup> BDI가 PFC 모드로 동작할 때와 Inverter 모드로 동작할 때의 소신호 방정식은 식(5)와 식(6)으로 나타낼 수 있다.

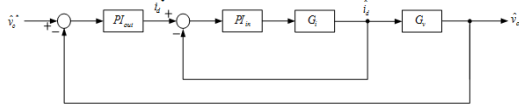


그림 3 간략화 된 소신호 모델 블록도

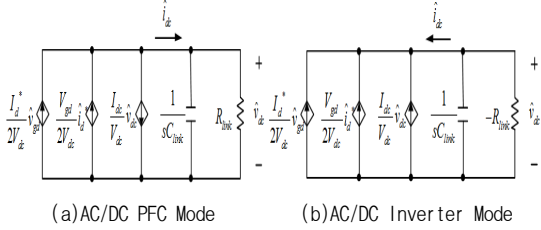


그림 4 링크단을 포함한 소신호 등가 회로

$$\hat{i}_{dc} = \frac{V_{gd}}{2V_{dc}} \hat{i}_d^* + \frac{I_d^*}{2V_{dc}} \hat{v}_{gd} - \frac{I_{dc}}{V_{dc}} \hat{v}_{dc} \quad (5)$$

$$\hat{i}_{dc} = \frac{-V_{gd}}{2V_{dc}} \hat{i}_d^* - \frac{I_d^*}{2V_{dc}} \hat{v}_{gd} - \frac{I_{dc}}{V_{dc}} \hat{v}_{dc} \quad (6)$$

이 때의  $V_{dc}$ 와  $I_{dc}$ 는 링크 단의 전압과 전류이며  $V_{gd}$ 와  $I_d$ 는 계통 전압과 계통 전류의 최대치를 나타낸다.

수식(5)와 수식(6)에 링크 콘덴서와 부하를 포함한 전력 변환 소신호 방정식의 소신호 등가 회로를 그리면 그림 4로 나타낼 수 있다.

그림 4를 통해 제어 출력 전달함수를 유도하면 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$G_{vPFC} = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_d} = \frac{V_{gd}}{4I_{dc}} \frac{1}{1 + 0.5C_{link} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} s} \quad (7)$$

$$G_{vINV} = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_d} = -\frac{V_{gd}}{4I_{dc}} \frac{1}{1 - 0.5C_{link} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} s} \quad (8)$$

### 3. 제안 모델의 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문은 제안된 전달함수의 정확성 및 제어기 설계 타당성을 검증하기 위해 표 1과 같이 3kW 급 파라미터 값들을 선정하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

표 1 BDI의 파라미터 값  
Table 1 PARAMETERS OF EXAMPL BDI

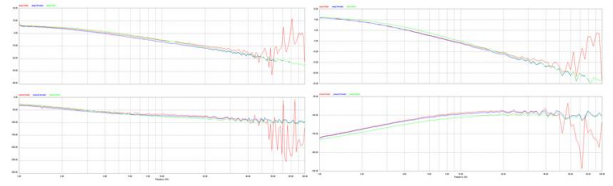
Operating frequency	30[kHz]	Grid voltage	220[Vrms], 60[Hz]
Link Voltage	350[V]	Inductor	2[mH]
Link Current	8.57[A]	Link Capacitor	3[mF]

그림 3를 통해 페루프 전달함수를 유도하면 식(9)와 같다.

$$T_s(s) = PI_{voltage} \frac{PI_{current} G_i}{1 + PI_{current} G_i} G_v \quad (9)$$

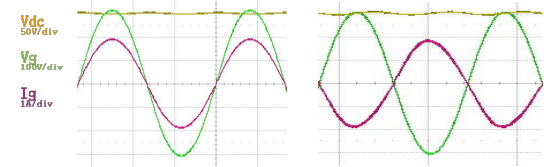
PFC 모드일 때,  $G_v$ 는  $G_{vPFC}$  이며 Inverter 모드일 때,  $G_v$ 는  $G_{vINV}$ 이다.

소신호 모델, 간략화 한 모델과 실제 회로의 페루프 전달함수를 보드선도로 나타내면 그림 5으로 나타낼 수 있다.



(a)PFC Mode (b)Inverter Mode

그림 5 소신호 모델, 간략화 한 소신호 모델과 실제회로를 사용하여 PSIM으로 측정된 페루프 전달함수 보드선도



(a)PFC Mode (b)Inverter Mode

그림 6 BDI의 정상상태 파형

그림 5에서 보여지 듯이 실제 회로와 소신호 모델의 보드선도가 거의 일치하는 것을 통해 제안된 제어 출력 전달 함수의 정확성을 확인할 수 있으며 그림 6의 실험 파형 결과를 통해 제어기 설계의 타당성을 검증하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 DQ 변환을 적용한 BDI 소신호 등가 회로 및 정확한 제어기 설계를 위한 제어 출력 전달함수를 제안하였다. 이로 인해 설계 사양에 따라 정확한 이중 루프 제어기 설계가 가능해졌으며 시스템의 안정도 판별 역시 예상 할 수 있음을 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 대학IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음  
(NIPA 2011 C1090 1121 0005)

### 참고 문헌

- [1] B. Saritha and P.A.Jankiraman, "Observer based current control of single phase inverter in DQ rotating frame", IEEE PEDES Proceedings, pp. 1 5, 2006
- [2] 김문환, 김환용, 한상규, 노정욱, 홍성수, "3상 Voltage Source Converter의 소신호 모델에 관한 연구", 전력전자학회 2010 학술대회 논문집, pp. 412 413. 2010. 7.
- [3] Runxin Wang, Jinjun Liu and Hao Wang, "Small Signal Analysis of the Lower Frequency Power Transfer Model." The 7<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics (ICPE'07), Daegu, Korea, Oct. 22 26, 2007, pp. 102 106.