

# 병렬 연결된 계통연계형 인버터의 LCL필터 공진현상 분석 및 액티브댐핑

김민국, 정상혁, 정세형, 최세완, 김광섭\*  
 서울과학기술대학교, \*카코뉴에너지(주)

## Analysis and Active Damping of LCL filter Resonances of Parallel-Connected Utility Interactive Inverters

Minkook Kim, Sanghyuk Jung, Sehyung Jung, Sewan Choi, Kwangseob Kim  
 Seoul National University of Science and Technology, \*KACO new energy Inc

### ABSTRACT

수 MW이상의 인버터 시스템을 구성하기 위해서는 계통연계형 인버터 다수가 PCC에 연결되어 계통과 연결된다. 이러한 경우 단일 인버터의 공진주파수가 LCL필터 값에 의해 결정되는 반면 각각의 인버터들이 서로 영향을 주고받아 공진주파수가 변화한다. 또한 공진주파수가 상용주파수에 가까워짐에 따라 시스템이 불안정해지고 기존의 액티브 댐핑기법으로 공진성분을 억제할 수 없다. 본 논문에서는 다수의 인버터가 계통연계시 발생하는 공진 현상을 인버터 모델링을 통해 분석하고, 이러한 시스템에 적합한 액티브 댐핑기법을 제안한다.

### 1. 서론

최근 태양광, 연료전지 발전시스템 등 분산발전 시스템의 단가와 효율을 고려하여 수 MW에서 수십 MW급으로 점점 대규모화 되는 추세이다. 수 MW이상으로 인버터 시스템을 구성하기 위해서는 그림 1과 같이 다수의 인버터가 LCL필터를 통해 PCC에 연결되어 계통과 연결된다. LCL필터는 저가격과 작은 부피로도 고조파를 효율적으로 저감시킬 수 있는 장점 때문에 많이 상용되고 있지만, 필터의 공진성분을 억제하기 위하여 적절한 댐핑기법이 필요하다. LCL필터의 공진성분을 제거하기 위해서 여러 가지 액티브 댐핑기법이 연구되었다.<sup>[1]</sup> 하지만 다수의 인버터가 계통연계시 LCL필터값 뿐만 아니라 다른 인버터의 LCL필터값, 계통연계하는 인버터 대수(N), 그리고 계통임피던스( $L_{grid}$ )에 따라 공진주파수가 변동되기 때문에 기존의 액티브 댐핑기법으로 공진성분을 억제할 수 없다.<sup>[2][3]</sup>

따라서 본 논문에서는 다수의 인버터가 계통연계시 발생하는 공진 현상을 인버터 모델링을 통해 분석하고, 시스템에 적합한 액티브 댐핑기법을 제안한다. 제안하는 액티브 댐핑기법은 시뮬레이션을 통해 본 논문의 타당성을 검증하였다.

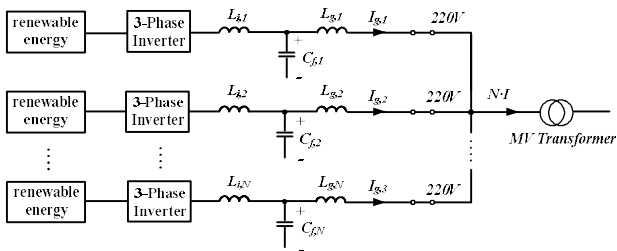


그림 1. 병렬 연결된 계통연계형 인버터 구성도

### 2. 계통연계형 인버터 모델링을 통한 공진현상 분석 및 액티브 댐핑

그림 1에서 각 인버터는 노튼등가 변환을 이용하여 하나의 전류원( $I_{N,n}(s)$ )과 등가 어드미턴스( $Y_n(s)$ )로 나타낼 수 있다.

$$I_{N,n}(s) = i_n^* \times G_{1,n}(s) \quad (1)$$

$G_{1,n}(s)$ 은 인버터측 출력전류( $i_{Li,n}$ )를 제어하는 컨트롤러(PI제어기)를 포함한 전류제어 전달함수이고, Digital Simulator는 컨트롤러에 의한 연산지연과 샘플링지연을 모델링한 것이다.<sup>[3]</sup>

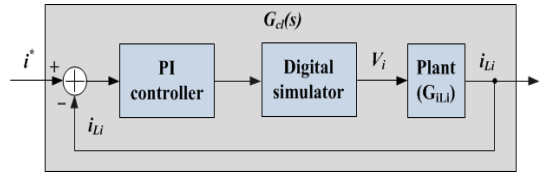


그림 2. 각 인버터 출력전류( $i_{Li,n}$ ) 제어 블록도

그림 3은 각 인버터를 노튼등가 변환 후, 다수의 인버터가 계통연계하는 상황을 등가모델로 표현한 것이다.

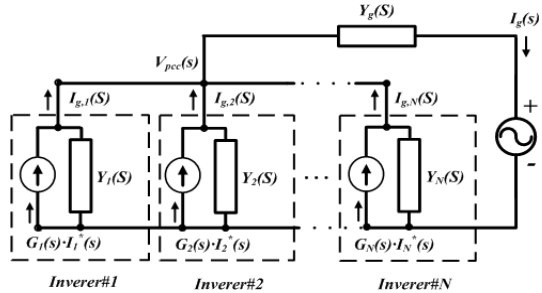


그림 3. 병렬 연결된 계통연계형 인버터 등가모델

모든 인버터의 LCL필터값( $L_{gi}, C_{fi}, L_{fi}$ )와 제어기특성( $K_p, K_i, T_s$ )이 같다고 가정하면 위의 등가모델을 통해 인버터 출력전류 지령치( $i_n^*$ )에 대한 계통주입전류( $i_{g,n}$ )의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{I_{g,n}(s)}{I_n^*(s)} = G_{1,n}(s) \cdot \frac{L_i C_f \{L_g + L_{grid}(N-1)\} s^2 + L_{grid}(N-1) + L_i + L_g}{L_i C_f \{L_g + L_{grid}^2 N\} s^2 + L_i + L_g + L_{grid} N} \quad (2)$$

그림 4는 식 (2)의 전달함수에 표 1의 파라미터를 적용한 bode diagram이다. 인버터 대수(N)에 따른 공진주파수의 변동을 확인할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 인버터 사양

- $P_{inv} = 350\text{kW}$     •  $f_{sw} = 3\text{kHz}$     •  $f_s = 6\text{kHz}$
- $V_{LL} = 290\text{V}$     •  $V_{DC} = 600\text{V}$     •  $L_{grid} = 30\mu\text{H}$
- $L_i = 65\mu\text{H}$     •  $C_f = 360\mu\text{F}$     •  $L_g = 50\mu\text{H}$

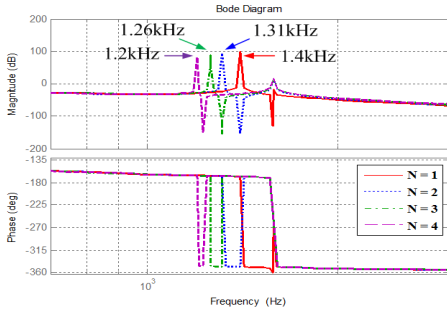


그림 4. 인버터 대수(N)에 따른 공진주파수 변동 그래프

그림 4로부터 인버터 대수가 증가함에 따라 공진주파수( $\omega_{res}$ )가 점점 계통주파수에 가까워지는 것을 알 수 있다. 또한 식 (2)로부터 공진주파수를 구하면 식 (3)이 나오고 식 (3)에 표 1의 파라미터를 대입하여 공진주파수를 구하면 그림 4의 공진주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

$$w_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_y + L_{ygrid} \cdot N}{L_i \cdot (L_y + L_{ygrid} \cdot N) \cdot C_f}} \quad (3)$$

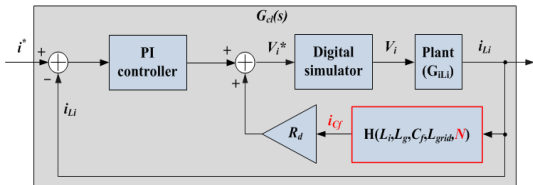
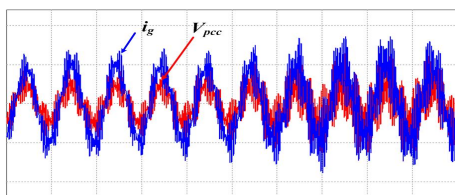


그림 5. 제안하는 액티브 댐핑기법

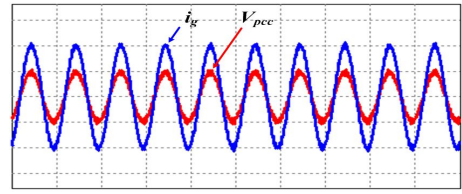
그림 5는 제안하는 액티브 댐핑기법의 제어블록도이다. 기존 액티브 댐핑기법에서 계통연계하는 인버터 대수 N을 추가하여 캐패시터에 흐르는 전류를 추정한 후 가상 임피던스( $R_d$ )에 걸리는 전압을 보상해줌으로써 공진성분을 억제한다.

### 3. 시뮬레이션 결과

제안한 병렬 연결된 계통연계형 인버터의 액티브 댐핑기법의 타당성을 입증하기 위하여 그림 1과 같이 2대의 인버터 계통연계 시 표 1의 사양으로 시뮬레이션을 진행하였다.



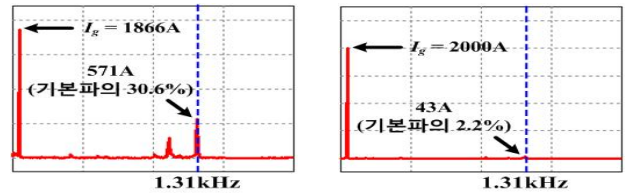
(a)



(b)

그림 6. 2대의 인버터 계통연계 시 출력파형  
(a)기존 액티브 댐핑기법 적용 (b)제안한 액티브 댐핑기법 적용

그림 6의 (a)에서 2대의 인버터 계통연계 시 기존 액티브 댐핑기법을 적용하였을 때 출력파형이 점점 발산하는 것을 볼 수 있지만, (b)에서 제안한 액티브 댐핑기법을 적용하였을 때는 공진성분이 억제된 것을 확인할 수 있다.



(a)

(b)

그림 7. 2대의 인버터 계통연계 시 FFT  
(a)기존 액티브 댐핑기법 적용 (b)제안한 액티브 댐핑기법 적용

그림 7의 (a), (b)는 각각 그림 6의 (a), (b)의 계통주입전류( $i_g$ )에 대한 FFT 파형이다. 인버터 2대 계통연계 시 기존 액티브 댐핑기법을 적용하였을 경우 공진주파수에서 기본파의 30.6%에 달하는 고조파 성분이 남아있지만, 제안한 액티브 댐핑기법을 적용하였을 경우 2.2%의 고조파 성분이 남아있는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 다수의 인버터가 계통연계 시 발생하는 공진현상을 인버터 모델링을 통해 분석하고, 시스템에 적합한 액티브 댐핑기법을 제안한다. 제안하는 액티브 댐핑기법은 시뮬레이션을 통해 본 논문의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 카코뉴에너지(주)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] Y. Lei, Z. Zhao, H. He, S. Liu and L. Yin, "An improved virtual resistance damping method for grid connected inverters with LCL filters," in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Phoenix, US, 2011, pp. 3846-3822.
- [2] Juan Luis Agorreta, Mikel Borrega, Jesús López, and Luis Marroyo, "Modeling and Control of N Paralleled Grid Connected Inverters With LCL Filter Coupled Due to Grid Impedance in PV Plants", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 26, No. 3, March. 2011
- [3] J. He, Y. Wei Li, D. Bosnjak and B. Harris, "Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel Inverter Based Microgrid", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, Jan. 2013