

# 가상 동기 발전기 기반의 그리드 포밍 컨버터의 Lead-Lag 보상기 위치에 따른 제어 특성 분석

배치환, 김학수, 노의철  
부경대학교

## Analysis of Control Characteristics According to the Position of Lead-Lag Compensator for Grid Forming Converter Based on Virtual Synchronous Generator

Chi-Hwan Bae, Hak-Soo Kim, Eui-Cheol Nho  
Pukyong National University

### ABSTRACT

가상 동기 발전기 기법 내 제동 상수는 시스템에 댐핑을 제공하는 역할을 하며 정상상태에서 제동 상수는 드롭 계수의 역수와 같다. 적절한 부하 분담을 위한 드롭 계수를 선정할 경우 제동 상수는 낮은 값을 갖게 되고 시스템에 적절한 댐핑을 제공하기 어려우며 감소하는 안정도를 높이기 위해 Lead-Lag 보상기를 사용한다. 본 논문에서는 가상 동기 발전기 기법 내 Lead-Lag 보상기의 위치에 따른 제어 특성을 비교 분석하고 적절한 보상기 파라미터를 산출하고자 한다.

### 1. 서론

신재생 에너지 기반의 전력전자 발전원이 증가함에 따라 계통의 주파수 안정성이 약화되는 문제가 있다. 이에 따라 동기 발전기의 특성을 모사하여 출력 전압과 주파수를 제어하는 그리드 포밍 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 그리드 포밍 컨버터 제어 기법 중 가상 동기 발전기 기법은 관성 상수를 통해 관성을 모의하여 계통의 급격한 주파수 변화를 억제하고 제동 상수를 통해 시스템에 댐핑을 제공한다. 이때 제동 상수는 정상상태에서 드롭 계수의 역수와 같은데 적절한 부하 분담을 위한 드롭 계수를 선정할 경우 제동 상수는 낮은 값을 갖게 되며 시스템에 적절한 댐핑을 제공하기 어렵다. 또한 부하 분담 능력을 가지면서 적절한 제동비를 가지기 위해서 관성 상수는 낮은 값을 가져야 한다. 따라서 부하 분담 능력을 가짐과 동시에 적절한 관성을 모의할 경우 시스템은 적절한 제동비를 가지기 어렵고, 감소하는 시스템의 안정도를 높이기 위해 Lead-Lag 보상기를 사용한다[2]. 본 논문에서는 가상 동기 발전기 기법에 대해서 Lead-Lag 보상기의 위치에 따른 제어 특성을 비교 분석하고, 극점 영점 분석을 통해 최적의 보상기 위치를 구하고 파라미터를 산출하고자 한다.

### 2. 그리드 포밍 컨버터의 Lead-Lag 제어기

#### 2.1 유효전력과 제동비

그림 1은 그리드 포밍 컨버터가 PCC단을 통해 계통과 연계된 시스템의 등가회로다. 그리드 포밍 컨버터의 내부 제어기로 가상 어드미턴스 기법을 적용할 경우 가상 역기전력  $E$ , 가상 인덕턴스  $l_v$ 가 직렬 연결된 등가회로로 나타낼 수 있다. 내부 제어기의 영향을 무시하고, 외부 제어기로 가상 동기 발전기 기법이 적용된 그림 1의 모델에 대해서 그리드 포밍 컨버터의 유효전력 응답특성에 대한 블록 다이어그램은 그림 2와 같다.

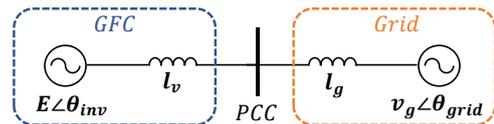


그림 1 그리드 포밍 컨버터의 계통 연계  
Fig. 1 Grid connection of grid-forming converter

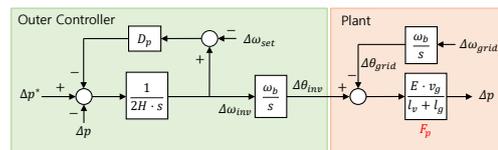


그림 2 그리드 포밍 컨버터의 유효전력 응답특성에 대한 블록다이어그램  
Fig. 2 Block diagram for active power response characteristics of grid-forming converter

$$\Delta p = \frac{1}{2H \frac{1}{F_p \omega_b} s^2 + D_p \frac{1}{F_p \omega_b} s + 1} \Delta p^* - \frac{2H \cdot s + D_p}{2H \frac{1}{F_p \omega_b} s^2 + D_p \frac{1}{F_p \omega_b} s + 1} \Delta \omega_{grid} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} D_p \sqrt{\frac{1}{2H \omega_b F_p}} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{1}{2H} \omega_b F_p} \quad (2)$$

여기서  $H$ ,  $D_p$ ,  $\omega_b$ 는 각각 관성 상수, 제동 상수, 정격 각주파수다. 그림 2의 유효전력 응답특성에 대한 전달함수는 식 (1)과 같으며 제동비와 고유 진동수는 식 (2)와 같다. 관성 상수와 제동 상수를 통해 컨버터는 관성을 모의하고 적절한 제동비를 가질 수 있다. 식 (1)에 대해서 유효전력은 계통 주파수 변화에 대해 정상상태에서  $D_p \Delta \omega_{grid}$  크기의 오차가 발생하는데 이는 주파수 변화에 따라 부하를 분담하는 드롭과 같으며 이때 제동 상수는 드롭 계수의 역수로 작용한다.

그림 3은 드롭 계수와 관성 상수에 따른 제동비를 나타낸다. 주어진 관성 상수에 대해서 적절한 제동비를 가지기 위해 드롭 계수는 작은 값을 가져야 한다. 하지만 이는 주파수 변화에 대해 큰 정상상태 오차를 야기한다. 또한 적절한 부하 분담을 위해 설계 가능한 관성 상수는 작은 값이다. 부족한 제동비의 원인은 그림 2의 루프 게인 내 두 개의 적분기로 인해 적절한 위상여유를 확보하지 못하기 때문이며 이는 Lead-Lag 보상기를 통해 위상여유를 확보하고 제동비를 높일 수 있다. 이때 보상기는 다음과 같다.

$$G_c(s) = \frac{1+T_N s}{1+T_D s} \quad (T_N/T_D = 5) \quad (3)$$

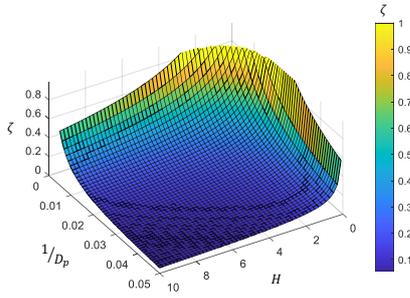


그림 3 관성 상수와 드롭 계수에 따른 제동비  
Fig. 3 Damping ratio with the variation of inertia constant and droop coefficient

### 2.1 Lead-Lag 보상기 분석

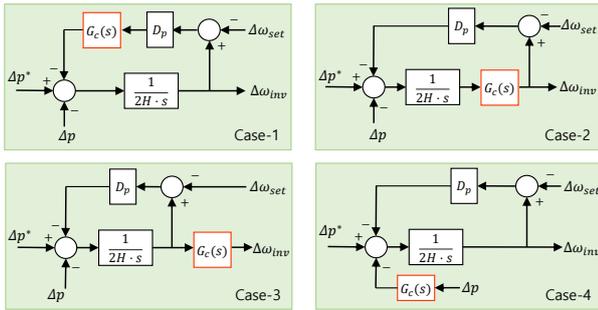


그림 4 Lead-Lag 보상기의 위치에 따른 제어 블록도  
Fig. 4 Control block diagram according to the position of L-L compensator

그림 4와 같이 보상기는 가상 동기 발전기 기법 내 위치할 수 있는 곳은 4가지 경우가 있다. 보상기는 위상 여유를 확보하여 제동비를 높이는 역할을 한다. 따라서 적절한  $T_N$ 과  $T_D$ 는 파라미터 변화에 대한 근계적에 대해 가장 제동비가 높은 극점이 위치할 때라고 할 수 있다.

그림 5는  $T_D$ 의 변화에 따른 보상기 위치에 대한 근계적을 나타내며 case-4의 경우 case-3과 동일하다. case-1의 경우  $T_D$ 의 변화에도 불구하고 적절한 제동비를 가지는 극점이 없으므로 보상기의 적절한 위치가 아니다.

그림 6은 설계한 보상기에 대해  $\Delta p/\Delta p^*$ ,  $\Delta p/\Delta \omega_{grid}$ 의 극 영점 좌표를 보이고 있다.  $\Delta p^*$ 에 대해 case-2와 case-3은 극점보다 느린 영점은 오버슈트를 야기한다.  $\Delta \omega_{grid}$ 에 대해 case-3

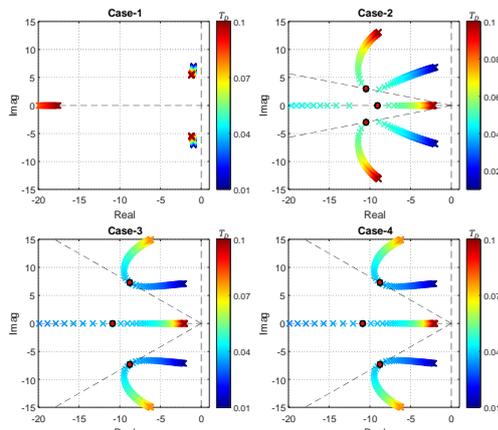


그림 5  $T_D$ 의 변화에 따른 근계적  
Fig. 5 Root trajectory with the variation of  $T_D$

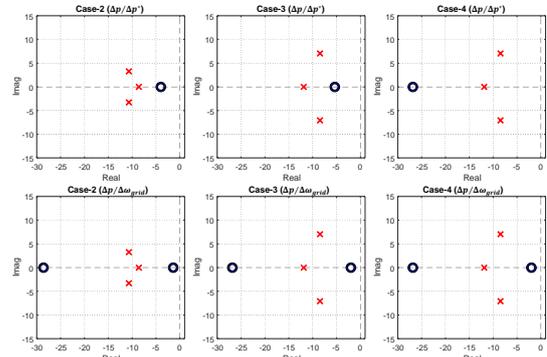


그림 6  $\Delta p/\Delta p^*$ ,  $\Delta p/\Delta \omega_{grid}$ 에 대한 극 영점 좌표  
Fig. 6 Pole zero map with the  $\Delta p/\Delta p^*$  and  $\Delta p/\Delta \omega_{grid}$

과 case-4의 응답특성은 동일하다. case-2의 경우 영점이 실수축에 더 가까우며 이는 좋지 못한 응답특성을 야기한다. 따라서 case-4가 최적의 보상기 위치라고 할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

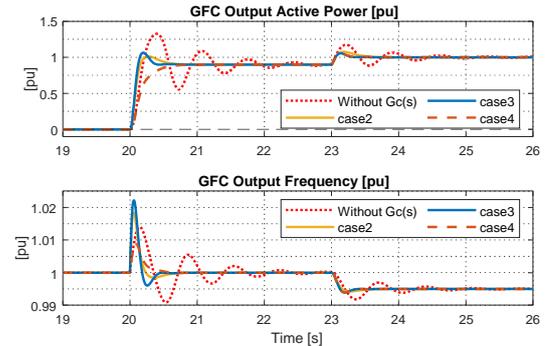


그림 7 유효전력과 주파수 파형  
Fig. 7 Waveforms of active power and frequency

그림 1의 모델에 대해서 컨버터의 유효전력 지령을 20초에 0.9[pu]로 변화시켰을 때, 23초에 계통 주파수가 0.5% 감소했을 때 컨버터의 유효전력과 주파수를 그림 7에 나타내었다. case-2와 case-3의 경우 유효전력 지령 변화에 대해 오버슈트가 발생하며 특히 case-2는 주파수 변화에 대해 오버슈트가 더 증가함을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 가상 동기 발전기 기법에 대해서 Lead-Lag 보상기의 위치에 따른 제어 특성을 비교 분석하였다. 근계적 분석으로 적절한 보상기 파라미터를 산출하였으며 극 영점 좌표 분석을 통해 최적의 보상기 설계를 할 수 있었다.

이 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (P0012451, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

### 참고 문헌

[1] J. Matevosyan, "Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration?", IEEE Power and Energy magazine, 17(6), pp.89-98, 2019  
[2] T. Qoria, "Inertia effect and load sharing capability of grid forming converters connected to a transmission grid", Proc. 15<sup>th</sup> IET Int. Conf. AC DC pp.1-6, 2019