

# 계통 임피던스의 변화에 따른 그리드 포밍 컨버터의 동작 분석

서용교, 이정현, 김학수, 노의철  
부경대학교

## Operation Analysis of Grid-Forming Converter with Variation of Grid Impedance

Yong-Kyo Seo, Jung-Hyun Lee, Hak-Soo Kim, Eui-Cheol Nho  
Pukyong National University

### ABSTRACT

그리드 팔로잉 컨버터(Grid-Following, GFL)와는 달리 그리드 포밍 컨버터(Grid-Forming, GFM)는 약계통에서 안정적인 동작과 관성 유지 및 전류 제한 등의 중요한 역할을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 계통 임피던스 변화 시, 그리드 포밍 컨버터의 다양한 외부 제어 전략에 대하여 주파수 변동을 분석하고자 한다.

### 1. 서론

신재생 에너지의 발전과 수요의 증가로 인해 계통에 전력전자 발전원(inverter based resource, IBR)의 비중이 증가하고 있다. 현재 대부분의 계통 연계 인버터는 그리드 팔로잉 기법으로 동작하고 있다. 그리드 팔로잉 컨버터는 약계통에서 발생하는 안정성 문제, 동기 발전기의 비중 감소로 인한 계통의 관성 하락을 막을 수 없다는 한계가 있다. 그리드 포밍 컨버터는 약계통에서 안정적인 동작, 계통의 관성 유지, 독립 운전 등 중요한 역할을 수행할 수 있어, 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리드 포밍 컨버터의 외부, 내부 제어 및 계통 동기화를 위해 가상 동기 발전기(VSG) 기법, PI구조, IP구조의 제어기법, 내부 제어를 위한 cascaded PI, 가상 어드미턴스 등이 연구되어 왔다.<sup>[1]</sup> 그러나 기존 연구의 분석은 주로 계통 임피던스가 변화하지 않는 상황에 국한되어 있어 현실적인 고장 및 비정상 상황을 충분히 반영하지 못한다. 그리드 포밍 컨버터가 계통 임피던스 변동에 의해 불안정해져 탈락될 경우, 문제가 생길 수 있다. 계통 연계 인버터는 사고에도 안정적으로 계통에 에너지를 공급할 수 있어야 한다. 따라서 계통 임피던스가 변화하는 상황을 모의하고 분석하는 것은 실제 계통에서 발생하는 다양한 상황을 이해하고 그리드 포밍 컨버터의 제어 전략을 개선하는 데 있어 중요하다. 본 논문에서는 그리드 포밍 컨버터의 다양한 제어기법에서 계통 임피던스가 변화하는 상황을 모의하고 분석하고자 한다.

## 2. 계통 임피던스 변화에 따른 동작 특성

### 2.1 그리드 포밍 컨버터의 제어

그림 1은 그리드 포밍 컨버터가 PCC단을 통해 계통과 연계된 시스템의 등가회로이다. 내부 제어기법으로 가상 어드미턴스 기법을 사용할 경우, 계통 연계 모델은 전압원  $v_m$ 과 가상 리액턴스  $L_v$ 가 직렬 연결된 등가회로로 표현할 수 있다. 외부 제어기법과 가상 어드미턴스 기법이 적용된 그리드 포밍 컨버

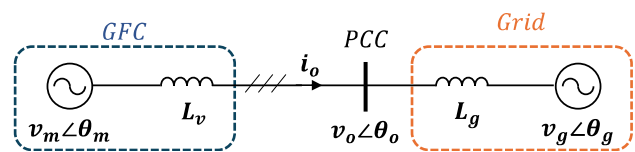


그림 1 간략화된 그리드 포밍 컨버터의 계통 연계 모델  
Fig. 1 Grid-connected model of grid-forming converter

터의 전체 제어블록도는 그림 2와 같다. 외부 제어기는 유효전력과 무효전력으로부터 출력 주파수와 출력 전압 지령을 생성하여 내부 제어기에 전달한다. 그림 3은 다양한 외부 제어기법의 제어블록도를 보인다. 유효전력 제어를 위해 다양한 제어기법들이 연구되었는데 (a)가상 동기 발전기(VSG) 기법, (b)PI구조, (c)IP구조 제어기법 등이 있다. 한편, 측정된 유효전력이 출력 주파수에 영향을 끼쳐 불안정하게 만드는 문제를 개선하기 위해 IP구조에 저역 통과 필터를 (d)전향경로 혹은 (e)궤환경로에 추가하는 기법이 제안되었다.<sup>[2]</sup> 실제 계통에서는 급격한 부하의 변동, 모터의 start-up 동작, 불평형 사고 등에 의해서 계통 전압의 불평형이 발생할 수 있다. 이러한 불평형에도 계통 연계 인버터는 정상 동작할 수 있어야 하므로, 여러가지 제어기법에서의 3상, 2상, 1상 불평형 동작을 모의하여 향후 제어 전략 개선을 위한 주파수 응답을 분석하고자 한다.

### 2.2 불평형 모의 시뮬레이션

IEEE에 따르면 단락비가 3 이상일 경우 강계통, 2보다 낮은 경우에는 매우 약한 계통으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 계통의 리액턴스를 단락비 3.33에 해당하는 0.3 p.u.에서 단락비 2에 해당하는 0.5 p.u.로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 계통 안정도 분석을 위한 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터이다. 그림 4는 각각 IP구조, IP구조와 전향경로의 LPF, 궤환경로의 LPF구조의 외부 제어루프를 가지는 그림 1의 모델에 대해, 계통 임피던스가 4초에 급격하게 변화했을 때

표 1 계통 연계 시스템 파라미터  
Table 1 Grid-connected system parameters

$S_b$	5 [kVA]	$L_v$	0.5 [p.u.]
$v_g$	220 [V]	$\omega_{LPF}$	34.95 [rad/s]
$f_b$	60 [Hz]	관성 계수 $H$	5 [s]
$f_{sw}$	5 [kHz]	$K_P$	0.028

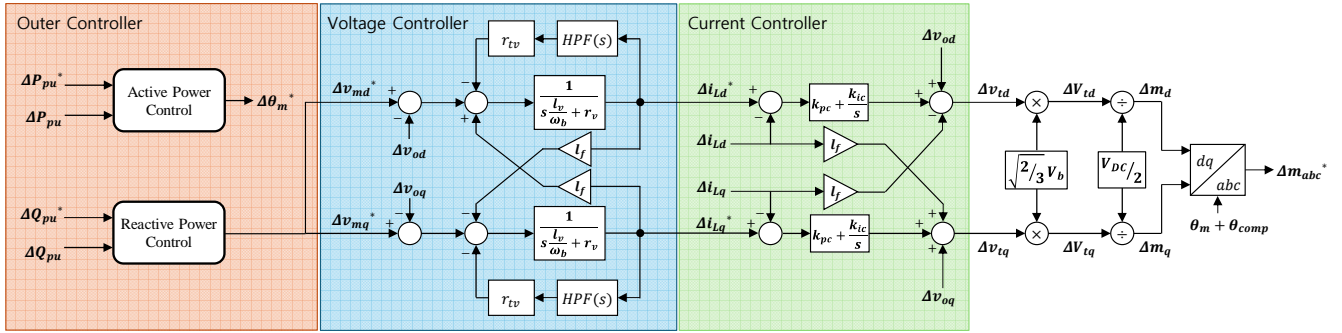


그림 2 그리드 포밍 컨버터의 전체 제어블록도  
Fig 2. Control block diagram of grid-forming converter

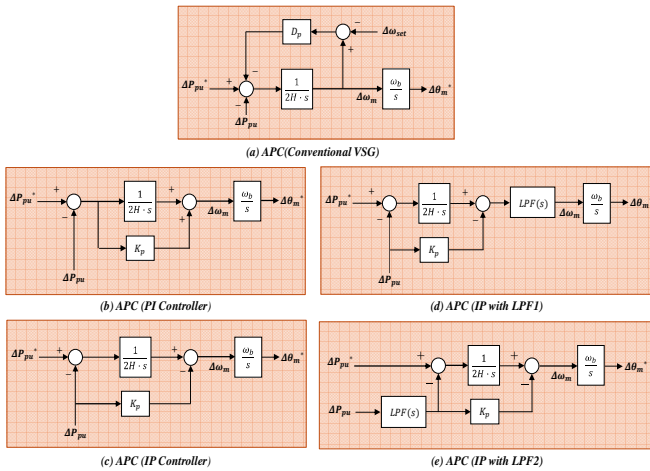


그림 3 그리드 포밍 컨버터의 다양한 외부 제어기법  
Fig 3. Several outer controller of GFM

의 주파수 변화를 나타낸다. 3상 동시 계통 임피던스 변동 시, IP 제어기의 경우 주파수가 가파르게 379.5 rad/s 까지 증가하였다가 감소한다. LPF가 적용된 제어기의 경우에는 비교적 완만하게 379 rad/s로 증가한 이후 다시 감소한다. 2상 계통 임피던스 변동 시에는 IP 제어기의 경우 주파수가 가파르게 379 rad/s로 증가할 뿐만 아니라, 1 rad/s 크기의 계통 주파수 2배 오실레이션이 발생한다. 이는 IP 제어 구조상 측정 유효전력의 값이 출력 주파수에 영향을 끼치기 때문이다. LPF가 적용된 제어기의 경우에는 상대적으로 완만하게 378.5 rad/s로 증가하고, 측정 유효전력의 값이 전향 경로 및 궤환 경로에 추가된 LPF에 의해 감쇠되어 계통 주파수 2배의 오실레이션은 더 이상 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 1상 계통 임피던스 변동 시에도 2상 계통 임피던스 변화와 비슷한 양상을 보인다. 주파수 안정성 측면에서 IP 제어기와 저역 통과 필터가 결합된 유효전력 제어기가 유리하지만, 3차 시스템이 되어 제어기 설계가 상대적으로 복잡해진다. 또한, 계통 불평형 시 발생하는 유효전력 및 무효전력의 오실레이션을 방지할 수 없어 추가 연구가 필요하다.

### 3. 결론

본 논문에서는 다양한 외부 제어기법을 가지는 그리드 포밍 컨버터의 계통 임피던스 변화에 따른 동작을 모의하고 분석했다. 3상, 2상, 1상 계통 임피던스 변화에 따른 주파수 응답을 검토하고, 이를 통해 각 제어기법의 성능 및 한계를 확인했다.

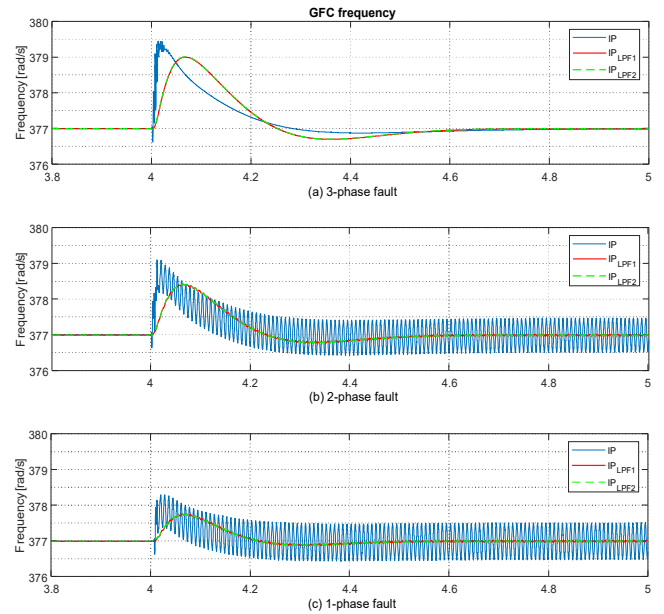


그림 4 계통 임피던스 변화 시의 주파수 변화  
Fig 4. Frequency variation in case of grid impedance variation

특히 IP구조에 저역 통과 필터를 활용한 외부 제어기법은 주파수 변동과 오실레이션을 감소시키는 데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (P0012451, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

### 참고 문헌

- [1] R. Aljarrah, B. B. Fawaz, Q. Salem, M. Karimi, H. Marzooghi and R. Azizipناه-Abarghoee, "Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review," in IEEE Access, vol. 12, pp. 5534-5561, 2024
- [2] C. H. Bae, H. S. Kim and E. C. Nho, "Analysis of Control Characteristics According to the Position of Lead-Lag Compensator for Grid Forming Converter Based on Virtual Synchronous Generator" Power Electronics Conference. pp. 506-507, 2023, July.