

# 불평형 계통 전압에서 그리드 팔로잉과 그리드 포밍 모드 간의 무순단 전환을 위한 제어 기법

김현준<sup>1</sup>, 이윤석<sup>1</sup>, 김재혁<sup>2</sup>, 이은수<sup>3</sup>  
제타일렉<sup>1</sup>, (주)효성<sup>2</sup>, 한양대학교 ERICA<sup>3</sup>

## Control Techniques for Seamless Transition between Grid-Following and Grid-Forming Modes under Unbalanced Grid Voltage Conditions

Hyunjun Kim<sup>1</sup>, Yoonseok Lee<sup>1</sup>, Jaehyuk Kim<sup>2</sup>, and Eunsoo Lee<sup>3</sup>  
Zeta Elec.<sup>1</sup>, Hyosung, Co., Ltd<sup>2</sup>, Hanyang University ERICA<sup>3</sup>

### ABSTRACT

전력망의 상태에 따라 Grid Following(GFL)과 Grid Forming(GFM) 모드 간의 전환은 필수적이다. 모드 전환은 전력 손실을 최소화하고 전력 공급의 신뢰성을 높이는 데 기여한다. 그러나 이러한 전환 과정은 내부 및 외부 제어 루프의 갑작스러운 변경을 유발할 수 있으며, 이는 전압 및 전류의 왜곡을 초래하고 시스템의 안정성을 위협할 수 있다. 특히, 불평형 부하 조건에서 GFL에서 GFM으로의 전환은 더욱 문제가 될 수 있다. 이는 전압 제어 루프에 역상분 전압으로 인해 Q-V 드롭에 필요한 기준 전압값의 크기에 진동이 발생하여 안정적인 모드 전환을 어렵게 한다.

본 논문에서는 250kW급 GFM인버터를 사용하여 이러한 문제를 해결하기 위해 불평형 전압 조건에서 정상분 및 역상분 제어를 각각 수행하여 GFL과 GFM의 무순단 전환을 가능하게 하는 방법을 제안한다.

### 1. 서 론

전력망에 연결된 인버터는 그리드 팔로잉(GFL) 제어와 그리드 포밍(GFM) 제어라는 두 가지 주요 제어 모드를 가지고 있다. GFL 제어 모드는 전력망의 주파수와 전압에 동기화되어 유효전력과 무효전력을 조절하는 반면, GFM 제어 모드는 인버터 자체가 전력 시스템의 주파수와 전압을 결정하며, 이는 전력망에서 독립적 운영이 필요할 때 중요하다. 그러나 이 두 모드 간의 전환은 전력망의 동적 상황에 따라 복잡하고 민감할 수 있으며, 특히 불평형 전압이 존재할 때 인버터의 안정성과 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.<sup>[1]</sup>

대부분의 논문은 계통연계 모드와 단독운전 모드 간의 전환에 중점을 두지만, 계통연계 모드에서는 GFL 및 GFM 제어 간의 전환도 필요하여 전력 시스템의 안정성 한계를 확장할 필요가 있다. 또한, 인버터가 전력망에 전력을 주입할 때 원활한 전환이 필요하다.

이전 연구에 따르면<sup>[2],[3]</sup> 전력망의 단락비(SCR)가 낮을 때는 GFL 컨버터가, SCR이 높을 때는 GFM 컨버터가 불안정해질 수 있다. 이는 강한 전력망에서는 GFL 컨버터가, 약한 전력망에서는 GFM 컨버터가 더 적합함을 시사한다. 전력망이 강할 때는 GFM 제어에서의 작은 위상 차이가 큰 유효전력 변동을 유발하여 시스템의 과부하를 초래할 수 있다. 이 경우 GFL 제어가 더 적합하며, GFM 제어는 GFL 제어로 변경되어야 한다.

따라서 전력 시스템의 안정성을 유지하기 위해 계통 연계 인버터의 제어 모드를 변경할 필요가 있다.

불평형 전압은 전력 시스템에서 자주 발생하는 문제로, 특히 GFM 모드에서는 인버터의 기준 전압에 진동을 발생시켜 전체 전력 시스템에 전력 진동을 초래한다. 이는 다른 부하 및 발전원과 상호 작용에도 영향을 미치며, 전력망의 전반적인 안정성과 효율성을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제에 대응하여 불평형 전압 상태에서 GFL과 GFM 제어 모드 간의 원활한 전환을 가능하게 하는 새로운 제어 전략을 제안하고자 한다.

본 논문은 PSCAD/EMTDC를 사용한 시뮬레이션 모델을 구축하여 제안된 전환 전략의 효과를 검증하고, 이론적 결과를 실험적으로도 확인하였다.

### 2. 정상분 역상분 제어 방법

#### 2.1 GFM의 드롭 제어 방식

본 논문에서는 GFM의 구현을 위해서 다양한 방식중 구조가 간단한 드롭 제어 방식을 적용하였다. 드롭 제어는 구조가 간단하고 매우 효과적이어서, 일반적인 운전 중 동기화를 위해 추가 장치가 필요 없다. 드롭 제어는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\omega^*$ 는 인버터 출력 주파수 지령치,  $\omega_n$ 은 정격주파수,  $D_f$ 는 유효전력 드롭계수,  $P_m$ 은 측정된 순시 전력 그리고  $P^*$ 는 유효 전력 지령치이다

$$\omega^* = \omega_n - D_f(P_m - P^*) \quad (1)$$

식(1)을 블록도로 표현하면 그림 1과 같다. 드롭제어는 일반적으로 관성을 모의하지 않는다. 하지만 측정된 순시 유효전력에 LPF를 취하게 되면 실제 관성 및 댐핑을 지닌 동기발전기와 같이 유사한 특성을 나타낼 수 있다.

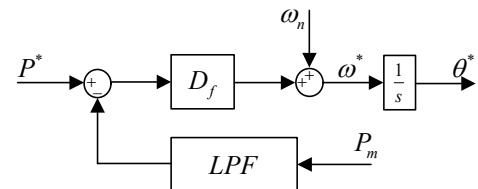


그림 1 p-f 드롭 제어 블록도  
Fig. 1 Block diagram of p-f droop controller

## 2.2 정상분 역상분 제어

정상분 제어기와 역상분 제어기를 구분하여 사용하는 것은 불평형 전압 조건에서도 안정적인 전력 공급을 가능하게 할 뿐만 아니라, GFL 모드와 GFM 모드 간의 원활한 모드 전환을 지원한다.

정상분 제어기와 역상분 제어기는 각각 전력 시스템의 대칭적 및 비대칭적 성분을 효과적으로 제어함으로써, 불평형 전압 조건에서도 안정적인 전력 공급뿐만 아니라 모드 전환을 가능하게 한다. 정상분 제어기는 주파수 및 전압 제어, 유효전력 및 무효전력 조절, 안정성 확보, 대칭적 성분 대응을 담당한다. 역상분 제어기는 비대칭 전압 보상, 불평형 부하 대응, 전력 진동 감소, 역상 성분 대응을 담당한다.

또한 이러한 제어 전략은 각 제어기가 각각의 전압 성분을 효과적으로 관리함으로써 모드 전환 시 발생할 수 있는 전압 및 전류 충격을 완화하고, 구분된 제어 전략은 인버터가 불평형 상태에서 빠르고 정확하게 대응할 수 있게 하여 동적 응답을 개선하며, Q-V 드롭 제어에서 필요한 기준 전압값의 진동을 줄여 안정적인 모드 전환을 가능하게 하기 때문에, GFL과 GFM 간의 모드 전환이 더 잘 이루어지게 한다.

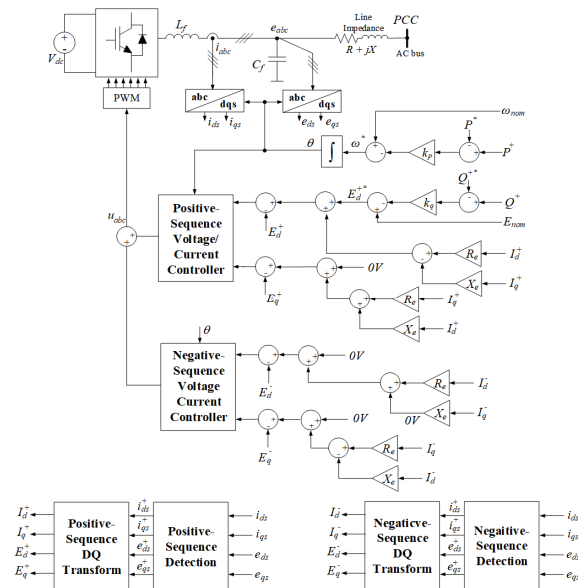


그림 2 정상분&역상분 GFM제어기

Fig. 2 Positive Sequence & Negative Sequence GFM Controller

## 3. 시뮬레이션 검증

제안하는 모드 전환 검증을 위해 PSCAD/EMTDC시뮬레이션틀을 사용하였다. 시뮬레이션은 유효 전력 250kW를 공급하고 무효 전력 115kVar를 출력하는 상황의 결과를 보여준다. 계통 전압은 불평형률이 2%이며, 시뮬레이션 시간 2초에서 GFM 모드에서 GFL 모드로 전환되고, 2.5초에서 다시 GFL 모드에서 GFM 모드로 전환된다. 이러한 시뮬레이션은 기존 제어기와 제안하는 제어기를 비교하기 위해 수행되었다

그림3은 기존 제어기를 사용할 경우의 모드전환에 대한 결과 파형을 보여준다. 2.5초에서 GFL → GFM으로 전환이 이루어 지고 이때 전력진동이 발생하여 시스템의 안정성에 영향을 미칠수 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 전압불평형으로 인해 모드 전환시 전류와 전압의 변화가 급격하게 일어나며, 이는

전력 시스템의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

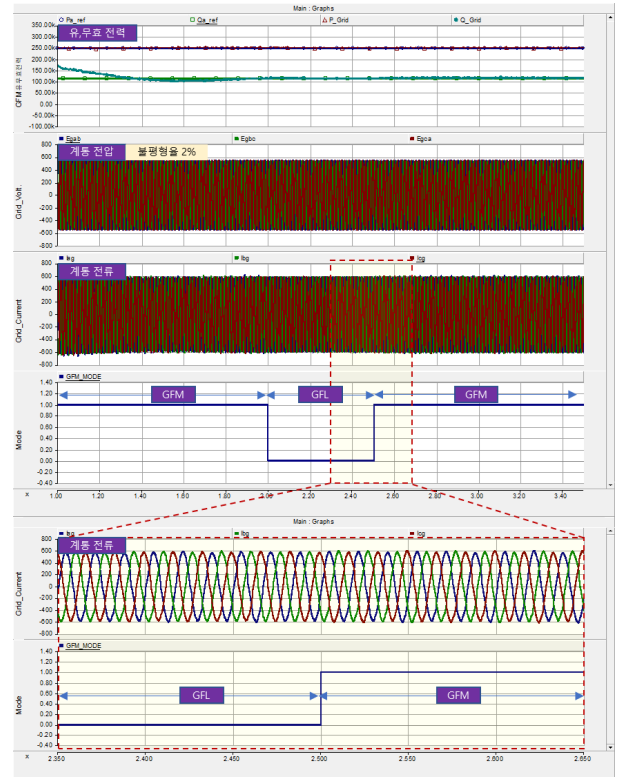


그림 3 일반적인 GFL ↔ GFM 모드 전환 시뮬레이션 파형

Fig. 3 Simulation Waveform of Conventional GFL ↔ GFM Mode Transition

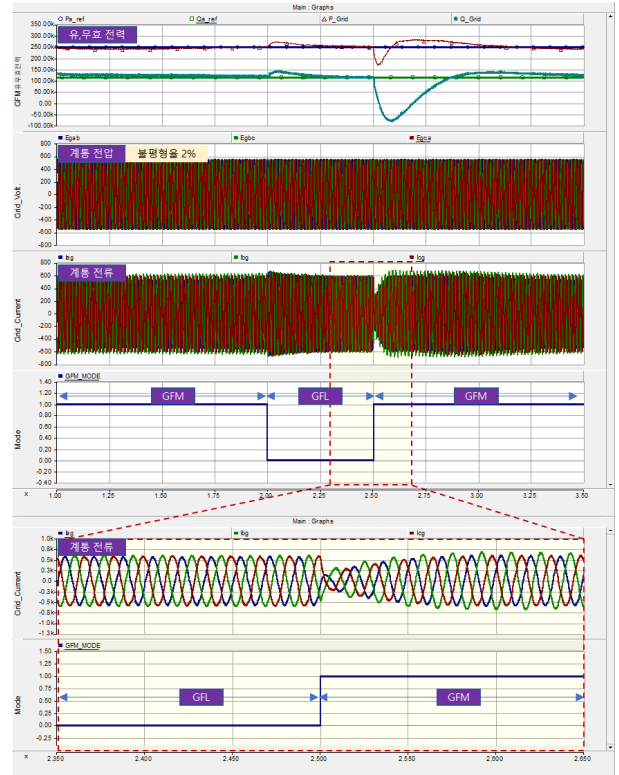


그림 4 제안하는 GFL ↔ GFM 모드 전환 시뮬레이션 파형

Fig.4 Simulation Waveform of the Proposed GFL ↔ GFM Mode Transition

그림4는 정상분(Positive Sequence) 제어기와 역상분(Negative Sequence) 제어기를 구분하여 사용한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 2.5초에서 GFL → GFM으로 전환이 이루어지고 이때 역상분 제어기에서 역상분 전류를 제어함으로써 과도상태 없이 안정적으로 모드전환이 수행되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전압 불평형에도 불구하고 안정적으로 전력시스템에서 그리드포밍 인버터가 동작함을 보여준다.

#### 4. GFM의 하드웨어 검증

시뮬레이션 결과의 검증을 위해 가상 관성이 적용된 VSG (가상 동기 발전기) 250kW 시뮬레이터와 250kW급 그리드포밍 인버터를 사용하였다. 시험은 DC 서플라이를 이용한 백투백(Back-to-Back) 시스템으로 대학과 연구실 내에서 저전력 환경에서도 가능하도록 구축되었다. 시험은 최대 275KVA 용량까지 진행되었으며, 그림 5는 실제 시험 환경을 보여준다.



그림 5 GFM인버터의 시험 환경 구축  
Fig. 5 Experimental setup of GFM inverter

하드웨어 실험 파형은 시뮬레이션 결과와 거의 동일한 양상을 보였다. 유효 전력 250kW와 무효 전력 115kVar를 공급하는 상황에서, 그림 6에서는 기존의 제어기를 적용하였을때의 실험파형을 보여준다. GFM ↔ GFL간의 모드 전환시에 과도 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

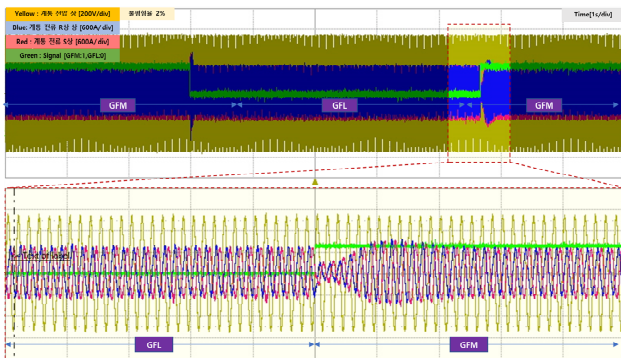


그림 6 일반적인 GFL ↔ GFM 모드 전환 실험 파형  
Fig. 6 H/W Waveform of Conventional GFL→GFM Mode Transition

그림 7은 제안하는 제어기를 적용한 모드전환을 보여준다. GFM 모드와 GFL 모드 간의 전환이 원활하게 이루어졌다. 전환 과정에서 전압 및 전류의 급격한 변동이 최소화되었으며, 이는 제안된 제어 전략이 하드웨어 환경에서도 효과적으로 동작함을 보여준다.

특히, 불평형 전압 2%가 적용된 상태에서도 안정적인 전력 공급이 가능하였으며, 모드 전환 시 발생할 수 있는 전력 진동이 최소화되었다. 하드웨어 실험 결과, 전류 THD(Total Harmonic Distortion) 역시 3% 미만으로 유지되었으며, 이는 전력 품질의 안정성을 높이는 데 중요한 역할을 한다.

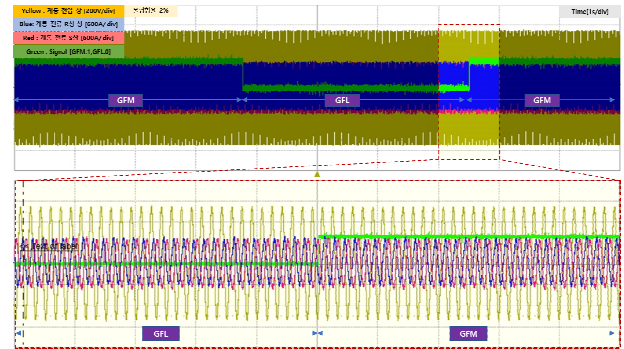


그림 5 GFM인버터의 시험 환경 구축  
Fig. 5 Experimental setup of GFM inverter

#### 3. 결 론

본 논문은 불평형 전압 조건에서 GFL 모드와 GFM 모드 간의 무순단 전환을 가능하게 하는 제어 전략을 제안하였다. 제안된 방법은 정상분 및 역상분 제어기를 구분하여 적용하여 불평형 전압 상태에서도 안정적인 전력 공급을 가능하게 하며, 모드 전환 시 전압 및 전류의 급격한 변화를 최소화한다. 이를 통해 전력 시스템의 안정성을 크게 향상시킬 수 있으며, 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 그 유효성을 입증하였다.

제안된 제어 전략은 250kW급 GFM 인버터를 사용한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션과 실제 하드웨어 실험을 통해 검증되었다. 기존 제어기와 비교하여 전압 불평형 2% 상태에서도 모드 전환이 원활하게 이루어짐을 확인하였다.

향후 연구로는 다양한 전력망 조건에서의 제어 전략 검증이 필요하다. 또한, 그리드포밍의 실증 시장 적용을 통해 안정성과 신뢰성을 확보해야 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [2] Y. Li, Y. Gu and T. C. Green, "Revisiting Grid-Forming and Grid-Following Inverters: A Duality Theory," IEEE Trans. Power Syst., vol. 37, no. 6, pp. 4541-4554, Nov. 2022.
- [3] X. Gao, D. Zhou, A. Anvari-Moghaddam and F. Blaabjerg, "Stability Analysis of Grid-Following and Grid-Forming Converters Based on State-Space Model," in Proc. 10th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia, Himeji, 2022, pp. 422-428, Japan.