

위상 비교 알고리즘을 통한 그리드 포밍 인버터 계통 투입 방법

강준규¹, 김재혁², 김진솔¹, 이은수¹
한양대학교 ERICA 전자공학부¹, (주)효성²

Grid Connection Method of Grid Forming (GFM) Inverters by Phase Comparison Algorithm

Jungyu Kang¹, Jaehyuk Kim², Jinsol Kim¹, and Eunsoo Lee¹
Hanyang University ERICA, Electrical Engineering¹, HYOSUNG, Co., Ltd²

ABSTRACT

본 논문에서는 그리드 포밍 (Grid-Forming, GFM) 인버터를 전력 계통에 안정적으로 투입하기 위해, 투입하고자 하는 GFM 인버터와 전력 계통의 위상을 각각 확인하고, GFM 인버터와 전력 계통의 위상 차이가 일정 수준 이하에서 GFM 인버터 투입용 차단기를 동작함으로써 안정적인 GFM 인버터 계통 투입이 가능한 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘을 통해 전력 계통에 투입되는 GFM 인버터는 안정적으로 계통에 투입됨으로써 순간 과도 전류 크기를 낮출 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 전력 계통의 전압과 주파수가 형성된 상황에서, 새로운 GFM 인버터 투입시 발생할 수 있는 여러 시나리오를 제시하고, 제안하는 알고리즘을 통해 GFM 인버터가 안정적으로 투입될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서 론

최근 전력 시스템에서는 재생 가능 에너지 발전량의 증가로 인한 전력 그리드 안정성 문제가 증가하고 있다. 재생에너지 수송용량이 높아짐에 따라 계통의 동특성이 예측 불가하게 변하고 있으며, 전력망의 안정성 확보를 위한 계통의 요구조건도 점차적으로 높아지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그리드 포밍 (GFM) 인버터는 기존 그리드 팔로잉 (Grid-Following, GFL) 인버터의 위상 추종을 통한 전류제어가 아닌 자체적으로 계통전압을 형성하므로, 전력 그리드 안정성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다 [1]. 이를 위해, 신재생에너지 또는 ESS용 GFM 인버터는 전력 계통으로의 안정적인 투입을 통한 전력공급이 중요하다.

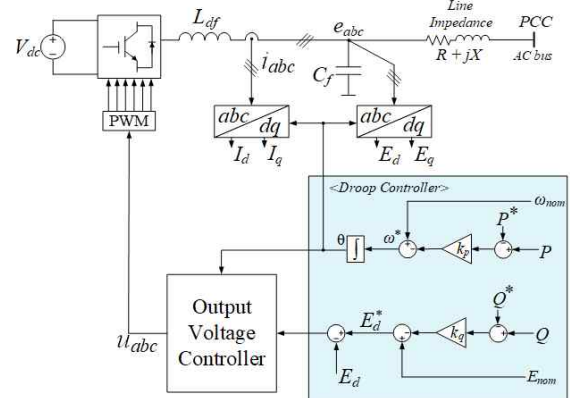
본 논문에서는 계통전압의 위상과 계통에 투입하고자 하는 GFM 인버터 위상을 비교하고 위상차가 충분히 작은 경우에만 GFM 인버터가 계통에 투입될 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 전력 계통의 위상을 확인하고, GFM 인버터와 전력 계통의 위상 차이가 일정 수준 이하에서 동작함으로써 안정적인 GFM 인버터의 계통 투입이 가능하도록 알고리즘을 구성하였다. 제안하는 알고리즘을 통해 GFM 인버터 투입시 과도전류를 최소화함으로써 GFM 인버터를 구성하는 컨버터의 전류부담을 줄일 수 있으므로 전력 그리드 운용 안정성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 기존 GFM 인버터의 단독 부하 분담시 다른 GFM 인버터가 새로이 투입되는 시나리오를 가정하였고, 위상차가 일정 수준 이하에 투입됨으로써 과도전류가 개선됨을 PSCAD 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하였다.

2. 제안하는 위상 비교 알고리즘 및 시뮬레이션

2.1 제어 방식 및 위상 비교 알고리즘 분석

본 논문에서 사용하는 제어 방식은 드롭 제어 기반 그리드 포밍 제어로서 전력 그리드에 연결된 분산 에너지 자원이 자체적

으로 계통에 연결되어 전압을 형성함으로써 계통의 강건성을 증가시킬 수 있는 방법이다 [2]. 드롭 제어는 분산 에너지 자원의 운영을 조정하고 전력 그리드의 요구에 맞추기 위해 드롭 간 협력을 수행해 에너지 생산과 소비를 최적화하고 그리드의 전압과 주파수를 안정화시킬 수 있다. 본 논문에서 제안하는 드롭 제어 컨트롤러는 그림 1에 제시되어 있으며, 유효전력은 주파수, 무효전력은 전압에 의해 결정됨을 가정하여 드롭 컨트롤러를 설계하였다. 그림 1과 같이 유효전력 P 과 유효전력 지령 P^* , 드롭 제어 계수 K_p , nominal 주파수 ω_{nom} 을 통해 지령 주파수 ω^* 를 도출할 수 있다 [1]-[2]. 각속도 값을 계산 후 적분하면 θ 이 도출되며 이는 전류값을 dq변환시 사용된다. 동일한 원리로, 무효전력 정보를 통해 전압 지령을 도출할 수 있으며, 이를 센싱된 전압과 비교 후 제어기를 통해 스위치 지령전압을 생성할 수 있다.



1 제안하는 GFM 제어기 구성도

Fig. 1 Overall Configuration of the proposed GFM controller

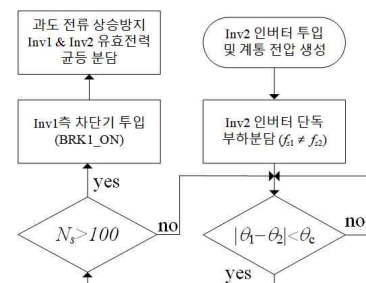
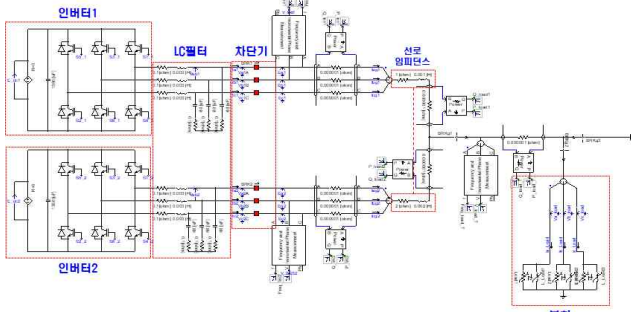


그림 2 제안하는 위상 비교 알고리즘

Fig. 2 Proposed Phase Comparison Algorithm

GFM 인버터의 계통투입 특성 확인을 위해 2개의 인버터 중 GFM 인버터 2(=Inv2)가 우선적으로 단독 운전함을 가정한다. Inv2에서 생성하는 계통전압을 통해 부하로 전력을 공급하게 될

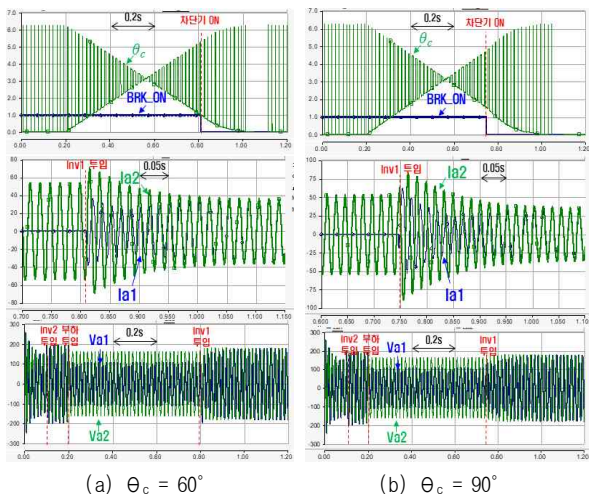
경우 Inv2는 P-f 드롭곡선 특성으로 인해 f_{nom} 인 60Hz 대비 더 낮아진 주파수를 가지며, 결국 GFM 인버터 1(=Inv1)의 f_{nom} 인 60Hz와 차이가 나게 된다. 부하가 연결된 후 Inv1 과 Inv2의 세타 차이인 θ_c 는 $|\theta_1 - \theta_2|$ 로 표현할 수 있으며, 논문에서는 $\theta_c < |\theta_1 - \theta_2|$ 인 경우 sampling time에 따라 해당 값을 카운팅 하도록 하였고, 카운팅 값 N_s 이 일정 수준 이상(본 논문에서는 100)이 될 경우 두 인버터 간 위상차가 없다고 판단하여 Inv1을 계통 투입하기 위한 차단기 BRK1_on을 동작하였다. 이를 통해 새로이 투입된 Inv1은 전력 계통 위상차가 최소이므로 과도전류를 최소화한 상태에서 계통에 투입되므로 컨버터의 부담을 줄일 수 있다. 이후 각 컨버터는 드롭제어에 의해 균등한 유효전력을 분담하도록 제어하며, 앞서 언급된 내용은 그림2에 요약하였다.



3 두 개의 GFM이 포함된 시뮬레이션 토폴로지
Fig. 3 Simulation Scheme including two GFM

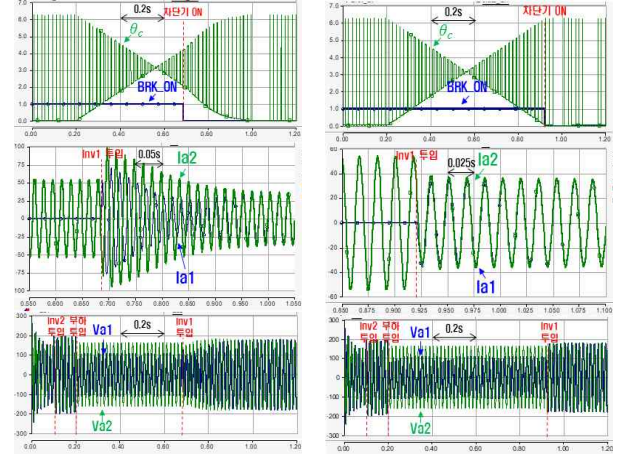
2.2 시뮬레이션 결과

본 논문에서 언급한 GFM 인버터투입에 따른 과도전류 성능 검증을 위해 그림3과 같이 시뮬레이션 회로도를 구성하였다. 인버터는 LC 필터 및 차단기가 포함된 2-level 3상 인버터이며, 선로 임피던스를 고려하여 부하단에 연결된 구조로 되어 있다. 계통 부하는 3상 균등 부하로서 Inv2 단독 운전 중 0.2s에 부하를 투입함으로써 Inv2에서만 유효전력을 분담하게 한다. 이로 인해 Inv2 동작 주파수가 강하게 되고 60Hz 동작 주파수로 설정한 Inv1과 Inv2의 위상차이인 θ_c 가 커진다. 상기 언급한 과도전류 특성을 검증하기 위해 그림 3에 제시된 Inv2의 단독 운전 및 부하 투입 이후 Inv1 투입 시 θ_c 에 따른 과도전류 특성 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a), (b), (c)에서는 θ_c 를 각각 60°, 90°, 120°인 임의의 각도로 설정하였고 그림 4(d)에서는 제안하는 알고리즘을 적용한 Inv1을 θ_c 가 충분히 작은 시점에 투입했을 때의 결과이다.



(a) $\theta_c = 60^\circ$

(b) $\theta_c = 90^\circ$



(c) $\theta_c = 120^\circ$

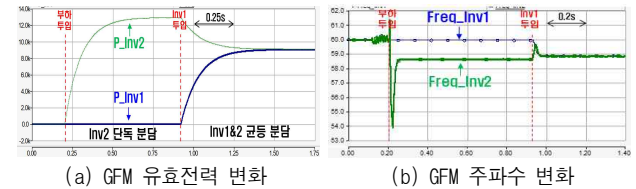
(d) $\theta_c < 5^\circ$ (Proposed)

그림 4 θ_c 별 차단기 투입에 따른 계통 전압 및 전류 특성

Fig. 4 Grid voltage and current characteristics w.r.t. θ_c

구분	$\theta_c = 60^\circ$	$\theta_c = 90^\circ$	$\theta_c = 120^\circ$	제한하는 알고리즘 ($\theta < 5^\circ$)
Peak current	70A	85A	100A	38A
Steady-state currents	38A	38A	38A	38A
Ratio(%)	184.2	223.7	263.2	100

표 1 θ_c 별 전류 특성과 정격전류 대비 과도전류 비율
Table 1 Current Characteristics w.r.t. θ_c



(a) GFM 유효전력 변화

(b) GFM 주파수 변화

그림 5 GFM 인버터 유효전력 & 주파수 변화

Fig. 5 Active power & frequency characteristics for two GFM Inverters

시뮬레이션 결과, θ_c 가 클수록 steady-state 전류 대비 peak 전류가 커짐을 확인할 수 있으며, 제안하는 알고리즘을 이용할 경우 최대 전류가 크게 낮아짐으로 인해 컨버터 전류 부담이 적은 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 표 1에 요약하였으며, 그림 4에 제시된 시퀀스로 구동시 두 개의 GFM 인버터의 유효전력 분담 및 주파수 변화를 그림 5에 나타내었다.

3. 결론

본 연구에서는 위상 비교 알고리즘을 통해 GFM 인버터를 안정적으로 전력 시스템에 투입하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 GFM 인버터와 전력 계통의 위상을 비교하고, 두 컨버터의 위상 차이가 일정 수준 이하일 때 GFM 인버터를 투입함으로써 정격 전류 이하의 동적 특성을 확보할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안하는 알고리즘을 통해 향후 많은 GFM 인버터가 계통에 안정적으로 투입할 수 있을 것으로 전망한다.

참고 문헌

- [1] Teng Liu, Xiongfei Wang, "Transient Stability of Single-Loop Voltage-Magnitude Controlled Grid-Forming Converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, No. 3, pp. 6158-6162, June 2021.
- [2] Roberto Rosso et al., "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends-A Review" *IEEE Open Journal of Industry Applications* vol. 2, pp. 93-109, Apr. 2021.