

무효전력 주입을 통한 그리드포밍 인버터의 단독운전 검출 방법

김민승¹, 김현준², 이은수*
 한양대학교^{1*}, 제타일렉²

Islanding Detection Method for Grid-forming Inverters by Reactive Power Injection

Minseung Kim¹, Hyun-jun Kim², Eun S. Lee*
 Hanyang University^{1*}, Zeta electronics²

ABSTRACT

계통연계 인버터의 단독운전은 전압의 크기와 주파수의 제어, 위상 오차로 인한 재폐로, 유틸리티 작업자의 안전 등 계통운영과 사업자 및 사용자에게 치명적인 문제로 대두되고 있다. 이 경우, 그리드팔로잉 인버터는 전류원 동작 특성으로 인해 100% 전력 공급 또는 전력을 공급하지 않는 상황에서도 단독운전 검출이 가능하다. 반면, 그리드포밍 인버터는 단독운전시 드롭 제어 특성상 부하 전력을 공급 시 인버터 주파수가 계통 주파수 대비 작아지고, 전력을 공급하지 않는 상황에서는 그리드포밍 인버터의 전압원 동작으로 인해 단독운전 검출이 불가능하다. 이러한 그리드포밍 인버터의 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 드롭제어기의 전력 지령에 무효전력 주입을 통한 그리드포밍 인버터의 단독운전 검출 방법을 제안하였으며, 380V/60Hz 계통에서 단독 운전 상황을 PSCAD/EMTDC를 통해 모의하여 제안하는 단독 운전 검출 방법을 검증한다.

1. 서론

기후 변화와 같은 환경문제로 인하여 전 세계적으로 지속 가능한 친환경 에너지로의 전환이 이루어지고 있으며 탄소중립을 목표로 정책을 펼치고 있다. 이에 대한민국 정부는 국제사회의 일원으로서 이러한 문제를 해결하기 위하여 ‘탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획’을 발표하였다[1].

이러한 정부의 계획 수행에 있어 전력산업에서 분산 전원으로 대두되는 재생에너지 발전원의 증가는 필연적이며 이를 전력 계통에 연계하여 제어하기 위해 계통연계 인버터가 활발하게 연구되고 있다. 이러한 인버터를 통해 계통에 연계된 재생에너지 발전원과 같은 분산 전원에서의 중요한 고려 사항 중 하나는 단독운전이다[2]. 이는 부하 및 분산된 자원을 포함하는 계통의 일부가 전력계통과 분리되어 단독으로 동작하는 것을 의미한다. 단독운전은 각각 의도하지 않은 단독운전과 의도적인 단독운전으로 구별할 수 있다. 의도하지 않은 단독운전은 주모선에서 분리되었지만 지속해서 전력이 발전 및 배전이 될 시 발생하는 반면, 의도적인 단독운전은 전력망의 일부를 주모선에서 의도적으로 분리하는 통제적 프로세스로 계통의 복원력을 강화하고 유지 관리 촉진 및 마이크로그리드 운영과 같은 특정 운영 위한 전력으로 사용된다[3].

한편, 단독운전시 인버터에서의 전압 크기 및 주파수가 계통의 정격값과 크게 다를 수 있어 최종 사용자 장비의 손상을 초

래할 수 있고 위상이 맞지 않는 재폐로로 인하여 과전류 혹은 과전압이 발생할 수 있다. 또한, 유틸리티 작업자의 위험 가능성을 배제할 수 없으며, 전력 품질 측면에서도 유틸리티와 독립 전력 생산자 간 책임에 대한 혼란이 가중된다.

기존 그리드팔로잉(Grid-Following, GFL) 인버터에서는 보호 계전기가 동작하지 않고 단독운전 상황이 발생하여 부하의 전력을 인버터가 100% 공급하고, 계통 전력이 0%인 상황에서 단독운전 검출 시험을 진행하게 되는 반면, 그리드포밍(Grid-Forming, GFM) 인버터의 경우 전압원 동작으로 인해 기존 단독운전 검출 표준을 적용할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 그리드포밍 인버터에서의 이와 같은 현상을 분석하고 극복하기 위해 무효전력 주입을 통한 새로운 검출 기법을 제시한다. 제안한 기법은 380V/60Hz 계통에서 PSCAD/EMTDC를 통해 검증하였다.

2. 그리드포밍 인버터의 단독운전 검출 방법

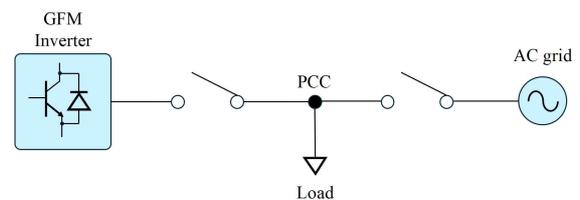


그림 1 그리드포밍 인버터와 계통 및 부하
 Fig. 1 Grid-forming inverter connected to grid and load

그리드포밍 인버터와 계통 및 부하를 그림 1과 같이 구성하였다. 계통의 공통접속점(Point of Common Coupling, PCC)에서 부하가 연계되어 있으며, 인버터측 차단기와 유틸리티측 차단기가 각각 구성되어 있다.

2.1 그리드포밍 인버터 단독운전 검출의 문제점

그리드포밍 인버터는 그림 2 및 식 (1), (2)와 같은 드롭제어기를 통해 제어가 된다. 유효전력 제어(Active Power Control, APC)를 위해 유효전력 측정값과 지령값의 차이 및 드롭 계수 K_p 로부터 주파수 보상분을 계산한 뒤, 주파수 지령에 보정하여 인버터 주파수를 형성한다. 이와 유사하게 무효전력

제어(Reactive Power Control, RPC)를 위해 무효전력 측정값과 지령값의 차이 및 드롭 계수 K_q 로부터 전압 보상분을 계산한 뒤, 정격 전압 지령에 보정하여 d축 전압 지령값을 계산한다.

$$\omega = \omega_{nom} + K_p(P - P_{ref}) \quad (1)$$

$$V_{d,ref} = V_{nom} + K_q(Q - Q_{ref}) \quad (2)$$

그림 1에서의 그리드포밍 인버터와 계통 및 부하에서 유틸리티측 차단기가 동작하게 되어 그리드포밍 인버터의 원치않는 단독운전 상황이 발생할 수 있다. 이 경우, 드롭 제어의 특성에 의한 그리드포밍 인버터의 전압원 동작으로 인하여 주파수 하락이 발생되며, 인버터에서 부하로의 전력공급에 오차가 발생할 수 있어 기존 단독운전 검출 표준을 적용할 수 없다. 또한, 무부하 동작시에도 전압이 형성되어 기존 단독운전 검출 방법으로 한계가 있다.

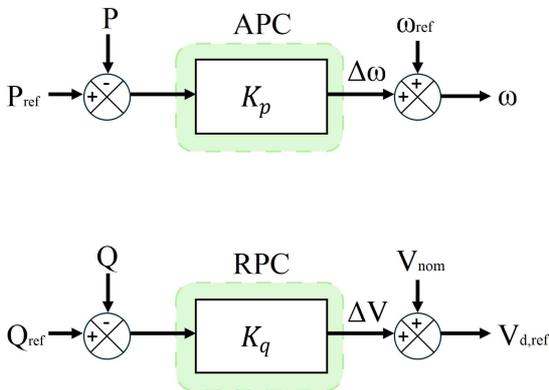


그림 2 드롭 제어기
Fig. 2 Droop controller

2.2 무효전력 주입 단독운전 검출 방법

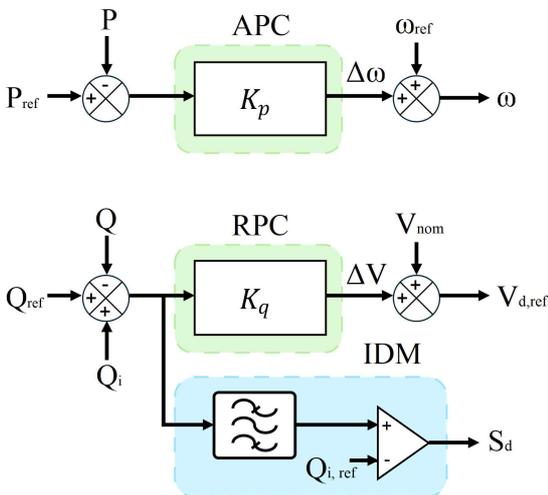


그림 3 무효전력 주입 드롭 제어기
Fig. 3 Reactive power injected droop controller

기존 드롭 제어를 통한 그리드포밍 인버터의 단독운전 검출의 어려움을 앞 절에서 설명하였다. 따라서, 본 연구에서는 무효전력 주입을 통한 단독운전 검출 방법(Islanding Detection Method, IDM)을 제안한다. 제안하는 단독운전 검출 방법은 그림 3 및 식 (3)과 같이 무효전력 측정값과 지령값의 연산하는 과정에 정현파 신호 Q_i 를 주입하여 구현할 수 있다.

$$V_{d,ref} = V_{nom} + K_q(Q - Q_{ref} + Q_i) \quad (3)$$

이때, 주입하는 정현파의 크기는 정격 무효전력 크기의 5% 이내, 정현파의 주기는 100 ms로 설정한다. 주입된 정현파가 측정값과 지령값의 차에 합산된 후 대역 필터(Band-Pass Filter, BPF)를 통과한다. 이때 대역 필터는 정현파의 주기에 맞게 통과될 수 있도록 디자인하며, 통과된 값이 임계치 $Q_{i,ref}$ 를 초과하면 그리드포밍 인버터가 단독운전을 하는 것으로 간주한다.

3. 모의시험 검증

그리드포밍 인버터가 단독운전하는 상황을 상정하기 위하여 그리드포밍 인버터 1기와 AC 계통 및 부하를 그림 1과 같이 구성하였다. 이때 선로의 영향을 무시하기 위해 선로는 이상적이라고 가정하고 정상 운전 중 0초에서 단독운전으로 동작하도록 모의하였다.

다양한 단독운전 상황을 모사하기 위하여 유효전력이 불일치 되는 상황, 무효전력이 불일치되는 상황, 유효전력과 무효전력이 불일치되는 상황과 불일치가 안되는 상황을 상정하여 총 4가지 경우의 모의시험을 진행하였다.

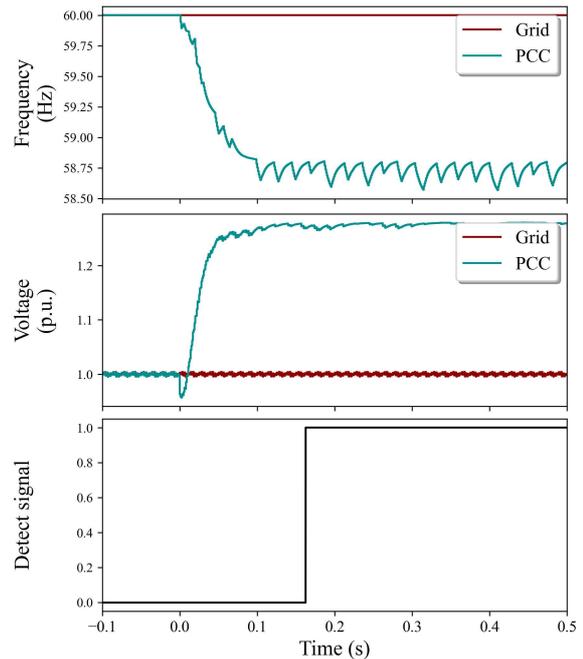


그림 4 유효전력 불일치 시 제안하는 단독운전 검출 방법의 동작

Fig. 4 Proposed islanding detection method under active power mismatch

그림 3과 같이 무효전력 주입 후 대역 필터를 통과한 값을 측정하여 단독운전을 검출하므로 무효전력 오차시 검출 속도가 빠른 것을 확인할 수 있다(그림 5, 6). 반면, 무효전력이 일치할 시 검출 속도는 다소 오래걸리나 가장 엄격한 단독운전 검출 표준인 0.5초[3]에 비하면 충분히 빠르므로 문제되지 않는다(그림 4, 7).

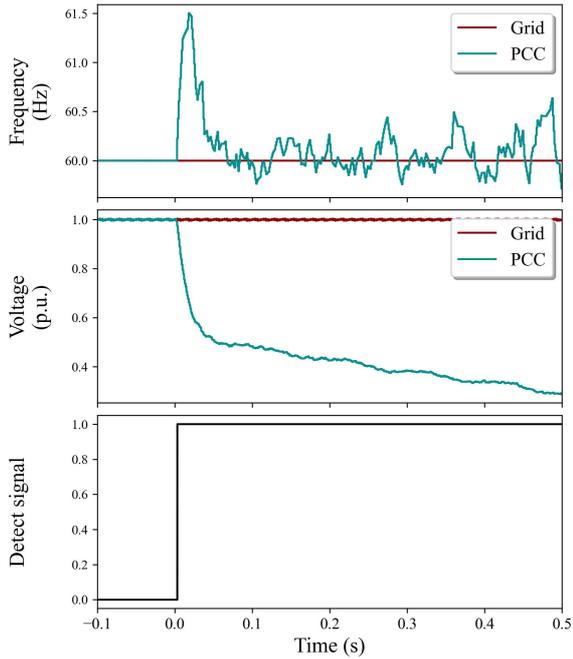


그림 5 무효전력 불일치 시 제안하는 단독운전 검출 방법의 동작
Fig. 5 Proposed islanding detection method under reactive power mismatch

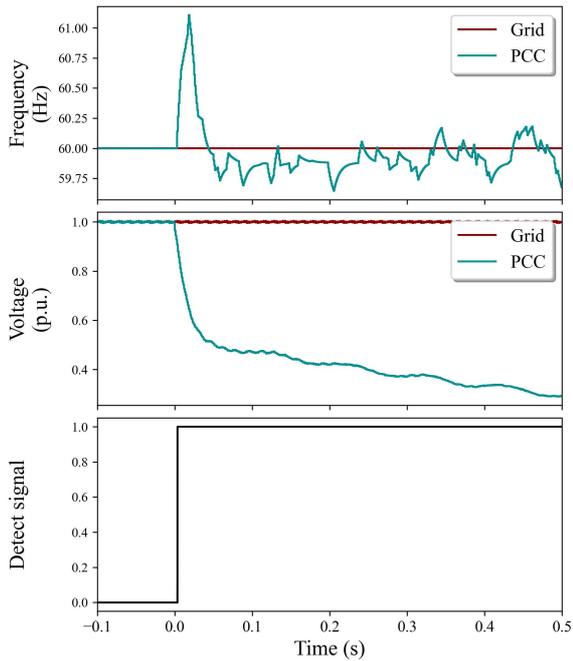


그림 6 유효전력 및 무효전력 불일치 시 제안하는 단독운전 검출 방법의 동작
Fig. 6 Proposed islanding detection method under active & reactive power mismatch

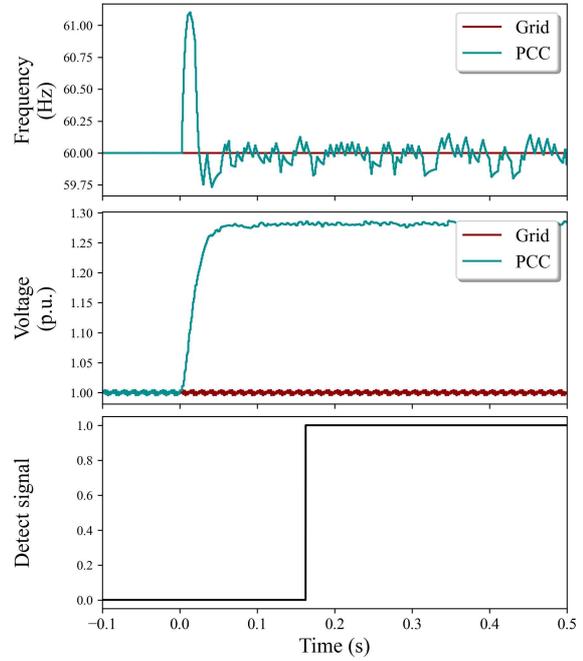


그림 7 유효전력 및 무효전력 불일치가 아닐 시 제안하는 단독운전 검출 방법의 동작
Fig. 7 Proposed islanding detection method under active & reactive power non-mismatch

4. 결론

본 논문에서는 무효전력 주입을 통해 그리드포밍 인버터의 단독운전을 검출하는 방법을 제안하였다. 모의시험 검증을 바탕으로 제안하는 무효전력 주입을 통한 단독운전 검출 방법을 이용하여 다양한 상황에서 그리드포밍 인버터의 단독운전 검출이 가능하고 0.2초 이내로 신속하게 검출되는 것을 보여주었다. 본 검출 기법은 향후 분산 전원의 운전 안정성을 가져다 줄 것으로 사료된다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022400000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)

참고 문헌

- [1] 대한민국정부, “탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획”, 2023
- [2] S. Dutta, P. K. Sadhu, M. Jaya Bharata Reddy, and D. K. Mohanta, “Shifting of research trends in islanding detection method - a comprehensive survey,” Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, no. 1, p. 1, Dec. 2018, doi: 10.1186/s41601-017-0075-8.
- [3] T. Liu, X. Wang, F. Liu, K. Xin, and Y. Liu, “Islanding Detection of Grid-Forming Inverters: Mechanism, methods, and challenges,” IEEE Electrification Magazine, vol. 10, no. 1, pp. 30 - 38, Mar. 2022, doi: 10.1109/MELE.2021.3139206.