

주파수 변화 대응 그리드포밍 인버터 출력제한 제어기법

양형규, 주동명, 노용수, 현병조, 김진홍, 최준혁[†]
 한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

A Power Limiting Control of Grid-Forming Inverter Under Frequency Changes

Hyoung-Kyu Yang, Dongmyoung Joo, Yong-Su Noh, Byoung Jo Hyon, Jin-Hong Kim, Jun-Hyuk Choi[†]

Korea Electronics Technology Institute Power System Research Center

ABSTRACT

그리드포밍 인버터는 스스로 전압 및 주파수를 형성하며 마치 동기발전기와 같이 응동하는 특성을 지닌다. 이 두 장치는 계통 주파수를 일정하게 유지시키기 위해 발전기 탈락 사고 시 큰 전력을 발생시켜 계통에 주입한다. 하지만 전력반도체 소자로 이루어진 그리드포밍 인버터는 동기발전기와는 다르게 과전류로 인한 하드웨어 파손의 위험성이 크다. 따라서 그리드포밍 인버터 하드웨어를 보호하며 일정한 출력을 유지하기 위한 출력제한 제어기법은 필수적이다. 본 논문에서는 그리드포밍 인버터 출력전류를 효과적으로 제한하기 위한 제어기법을 제안하며, 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

향후 다가올 에너지 대전환 시대에 동기발전기를 대체할 자원으로써 그리드포밍 인버터가 각광받고 있다[1]. 그리드포밍 인버터는 동기발전기와 마찬가지로 각 인버터마다 고유의 전압 및 주파수를 형성할 수 있는 능력이 있다. 이를 통해 전압 및 주파수가 불안정한 약계통에 연계가 원활하며 계통 안정도를 위해 가상관성을 공급할 수 있는 특성을 지닌다. 그러나, 연계된 계통의 주파수를 측정하지 않는 특징은 계통 주파수 사고 시 그리드포밍 인버터의 제어 불안정을 야기할 수 있다. 예를 들어 계통 주파수가 급격히 하락하는 경우, 그리드포밍 인버터 출력전압 및 계통전압 간에 큰 위상차가 발생함으로써 과도한 출력전류가 흐를 위험이 있다. 더군다나 전력반도체 소자로 이루어진 인버터는 동기발전기에 비해 과전류로 인한 하드웨어 파손의 위험이 크기 때문에 이를 고려한 출력제한 제어기법은 필수적이다.

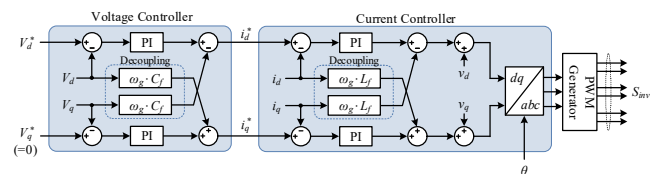
그리드포밍 인버터에서 기존 그리드팔로잉 인버터와 같이 단순히 전류제어 루프의 지령을 제한 하는 것은 외부 전압제어 루프의 적분 제어를 포화시킬 뿐만 아니라, 계통전압의 위상과 무관한 출력전압을 형성할 수 있기에 제어 불안정을 야기한다. 또한 계통 주파수 사고 시 연계를 끊는 것은 계통 안정화를 위해 개발된 그리드포밍 인버터의 본래 목적에 위배된다. 따라서, 본 논문에서는 그리드포밍 인버터 하드웨어를 보호하며 일정한 출력을 유지하기 위한 출력제한 제어기법을 제안한다. 본 제어기법은 시뮬레이션을 통해 구현되었으며 그 성능이 분석 및 검증되었다.

2. 출력제한 제어기법

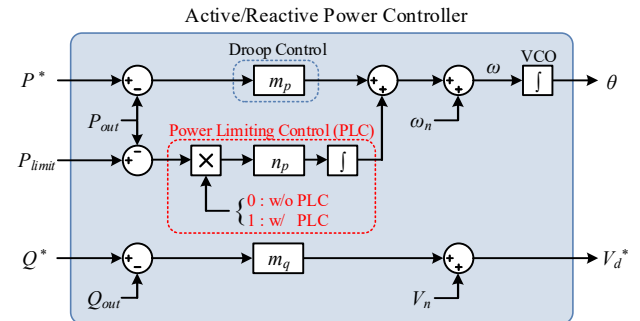
그리드포밍 인버터 제어구조는 그림 1에서 볼 수 있듯이, 전압 및 전류 제어기와 유효전력 및 무효전력 제어기로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안하는 출력제한 제어기법은 유효전력 제어기에 유효전력 한계값(P_{limit})을 추종하는 적분 제어기(Power Limiting Control, PLC)를 추가함으로써 구현된다. 적분 제어기는 정상동작 상황에서는 활성화되지 않고, 출력 유효전력(P_{out})이 P_{limit} 을 초과하는 한계상황에서 활성화되며, 이후 누적 연산을 시작한다. 최종적으로 출력전류를 한계값으로 제한하기 위해, P_{limit} 은 다음과 같이 연산된다.

$$P_{limit} = \sqrt{\frac{9}{4}(V_d^2 + V_q^2)I_{max}^2 - Q_{out}^2} \quad (1)$$

여기서, V_d , V_q 는 dq축 출력전압, I_{max} 는 출력전류 허용 최댓값, Q_{out} 은 출력 무효전력이다. 제안하는 제어기법을 안정적이고 효과적으로 활용하기 위해서는 적절한 적분이득(n_p)의 선정이 필요하다.



(a) 전압 및 전류 제어기



(b) 유효전력 및 무효전력 제어기

그림 1 그리드포밍 인버터 제어 구조

Fig 1 Control structure of grid-forming inverter

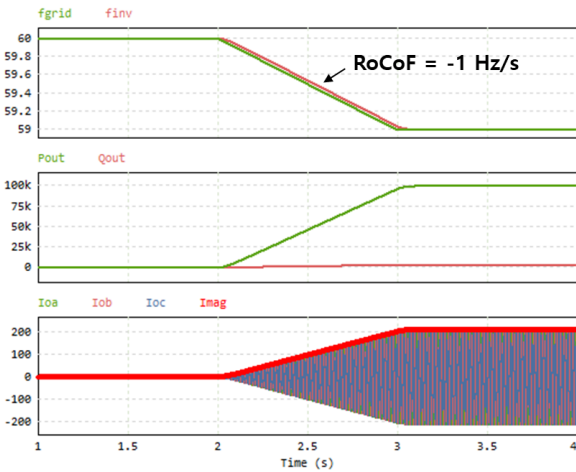
3. 시뮬레이션 검증

본 논문에서 제안하는 출력제한 제어기법의 성능을 검증하기 위해 PSIM 프로그램을 활용한 시뮬레이션을 진행하였다. 시스템 파라미터는 표 1에 정리되어있다. 시뮬레이션 결과는 그림 2 및 그림 3에 나타나있으며, 위에서부터 계통 및 인버터 주파수(f_{grid} , f_{inv}), 인버터 출력 유효/무효전력(P_{out} , Q_{out}), 3상 출력 전류 및 전류진폭(I_{oa} , I_{ob} , I_{oc} , I_{mag})를 보여준다. 시뮬레이션은 두 가지 조건에서 진행되었으며, 첫 번째는 계통의 주파수 변화율(Rate of Change of Frequency, RoCoF)가 -1 Hz/s로 고정된 상황, 두 번째는 계통 내 타 발전기가 탈락하여 계통 주파수가 변동하는 상황이다. 두 조건 모두에서 출력제한 제어기법을 적용하였을 경우, 인버터 출력전류가 사전에 설정한 100A로 제한 및 유지되는 것을 확인할 수 있다.

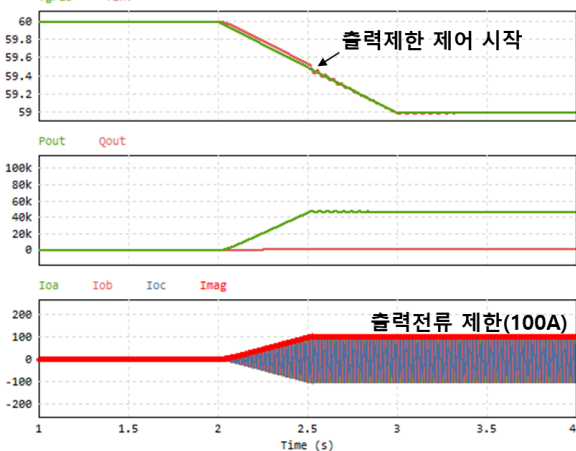
표 1 출력제한 제어기법 시뮬레이션 시스템 파라미터

Table 1 System parameters for power limiting control simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Rated Power, P_o	100 [kW]	Maximum Current Limit, I_{max}	100 [A]
Grid Voltage, V_g	380 [V _{rms}]	Droop Gain, m_p	0.0000628
Grid Frequency, f_g	60 [Hz]	Integral Gain, n_p	0.05



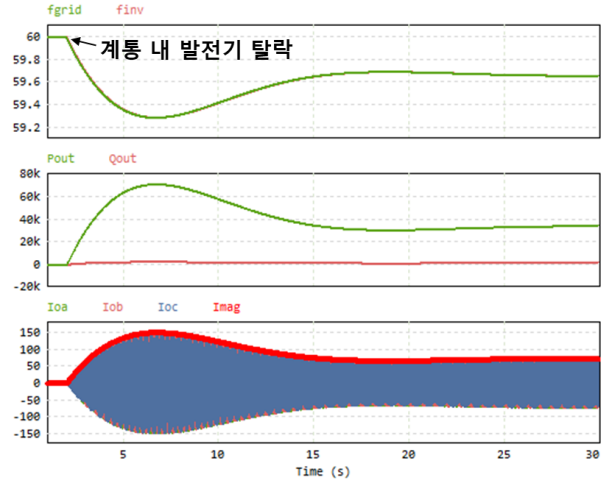
(a) 출력제한 제어기법 미적용



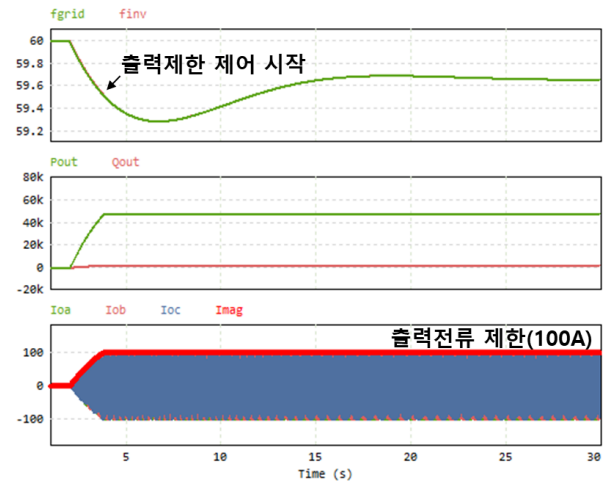
(b) 출력제한 제어기법 적용

그림 2 고정 RoCoF 시뮬레이션 결과

Fig 2 Simulation results under fixed RoCoF



(a) 출력제한 제어기법 미적용



(b) 출력제한 제어기법 적용

그림 3 발전기 탈락 시뮬레이션 결과

Fig 3 Simulation results under generator fault

4. 결론

본 논문에서는 계통 주파수가 변동하는 상황에서 그리드포밍 인버터 하드웨어를 보호하며 일정한 출력을 유지하기 위한 출력제한 제어기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 유효전력 제어기에 유효전력 한계값을 추종하는 적분 제어를 추가함으로써 구현되었으며, 그 성능이 시뮬레이션 검증을 통해 확인되었다. 제안하는 기법을 통해 계통 사고 시 그리드포밍 인버터의 더욱 안정적인 동작이 가능해질 것으로 기대된다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00233148, 분산에너지 계통접속 그리드포밍 토폴로지 및 인버터 핵심기술 개발)

참고 문헌

- [1] 양형규, 주동명, 박상민, 노용수, 김진홍, “그리드포밍 인버터용 전류제한 알고리즘 연구,” 전력전자학술대회 추계학술대회 논문집(2023), 120-121.