

DC 링크 전압 동기화를 활용한 연료전지 기반 그리드포밍 인버터 최적 제어 알고리즘

공임보, 김옥성, 채수용
포항공과대학교

Optimal Control Algorithm for Fuel Cell Based Grid Forming Inverter Utilizing DC Link Voltage Synchronization

Imbo Kong, Wooksung Kim, Suyong Chae
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지 기반 그리드포밍 인버터에 DC 링크 전압 동기화를 적용하여 연료전지 가스 확산 동특성을 보상하고 더 많은 예비력을 보장할 수 있는 방법론을 제안한다. 또한, 프론트엔드 컨버터에 주파수 기반 전력 지령 생성 P-f 드롭 제어를 도입하여 DC 링크 전압 동기화 과정에서 발생할 수 있는 저주파 진동 (Low Frequency Oscillation) 및 제한된 그리드포밍 (Limited Grid Forming) 문제를 효과적으로 개선하고 그리드포밍 동작을 보장하였다. 제안된 제어 기법 및 알고리즘의 성능은 실시간 시뮬레이션 HIL을 활용하여 평가하였다.

1. 서론

전 세계적으로 재생가능 에너지원의 활용이 급증하면서, 풍력 및 태양광 발전의 비중이 전력 시스템 내에서 점차 증가하고 있다. 이러한 재생에너지원은 화석 연료 기반의 전력 발전 방식에 비해 환경적 이점을 제공하지만, 자연 조건에 따라 발전량이 변동적이라는 큰 단점이 존재한다. 특히, 재생에너지의 발전 특성은 전력 계통의 안정성과 관성을 저하시키는 주요 원인으로 작용하고 있다. 전력 계통의 관성 감소는 주파수 변동을 초래하여 전력 품질 및 시스템 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

이러한 문제에 대응하기 위하여, 그리드포밍 기능을 갖춘 연료전지 인버터의 연구가 중요한 대안으로 떠오르고 있다. 연료전지 시스템은 화석 연료를 사용하는 발전 방식에 비해 배출가스가 없고, 에너지 변환 효율이 높다는 지속 가능한 에너지원으로서의 중요한 장점을 갖고 있다. 하지만, 연료전지 스택의 효율적인 활용을 위해서 주입된 연료 대비 최대의 전력 출력을 보장하는 Maximum Efficiency Point(MEP) 제어 시 내부 가스 확산 동특성으로 부하 변동에 신속하게 대응하지 못하는 문제를 야기하고, 따라서 계통 운영 중 충분한 예비력을 확보하는데 큰 장애로 작용한다^[1].

연료전지의 가스 확산 동특성으로 인해 충분한 예비력을 확보하는 데 있어 발생하는 문제를 해결하기 위해, DC 링크 전압 동기 제어(DVSC)^[2] 기법을 활용할 수 있다. DVSC 제어는 DC 링크 커패시터를 에너지를 저장하는 버퍼로 활용함으로써, 연료전지 기반 그리드포밍 인버터가 더 많은 예비력을 갖출 수 있도록 지원한다. 이 방법은 특히 부하의 급격한 변동 시 연료전지의 반응 속도가 느린 문제를 일부 해소할 수 있는

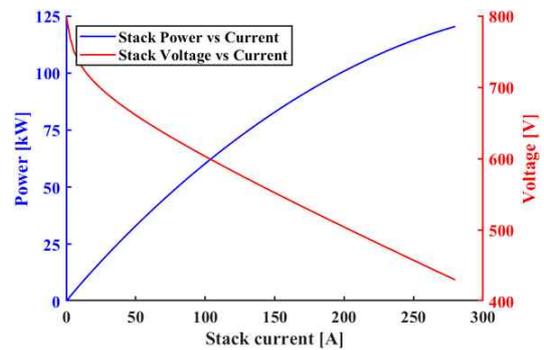


그림 1 PEM 연료전지 스택 모델 Polarization 커브

효과적인 솔루션이다. 하지만, DVSC 제어는 구조적으로 DC 링크 커패시터 동특성 때문에 시스템에 두 개의 적분기를 추가하는 효과를 야기하고^[2], 이는 저주파 진동 문제를 발생시켜 계통 내에서 발생할 수 있는 불안정성을 증가시킬 수 있다. 또한, 계통의 주파수 변동 및 부하 변동 상황에 제한된 그리드포밍 동작을 수행할 수 밖에 없다는 한계로 'Islanded mode'를 통한 독립적인 운영을 수행하기 어려운 중대한 제약을 갖고 있다.

본 논문에서는 연료전지 기반 그리드포밍 인버터에 적용된 DC 링크 전압 동기화 방법론을 통해 연료전지의 가스 확산 동특성을 보상하고, 이를 통해 더 많은 예비력을 확보하는 새로운 접근법을 제안한다. 추가적으로, 프론트엔드 컨버터에 도입된 동기 주파수 기반 전력 지령 생성 P-f 드롭 제어는 DC 링크 전압 동기화 과정 중 일반적으로 발생할 수 있는 저주파 진동 현상 및 제한된 그리드포밍 문제를 효과적으로 개선하고, 이를 통해 그리드포밍 동작의 신뢰성을 높였다. 또한, 제안한 시스템에 과도응답 안정도 분석을 통해 제어기의 댐핑 능력을 드롭 계수 변화에 따라서 평가하고 이를 실시간 시뮬레이션 HIL을 통해 검증하였다.

2. 본론

2.1 PEM 연료전지 스택 모델

Polymer Electrolyte Membrane(PEM) 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 전기화학 장치이다. 그림 1은 PEM 연료전지 스택의 Polarization 커브를 나타낸다. PEM 연료전지의 출력 전압은 Actuation loss (V_{act}), Ohmic loss (V_{ohm}), Concentration loss (V_{conc}) 세 가지 손실에 의해서 결정되고 균일한 스택 온도, 부분 압력 및 가스 농도를 가정하면

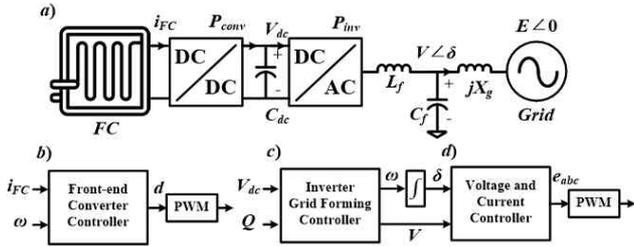


그림 2 a) 계통 연계 시스템 모델, b, c, d) 제어기

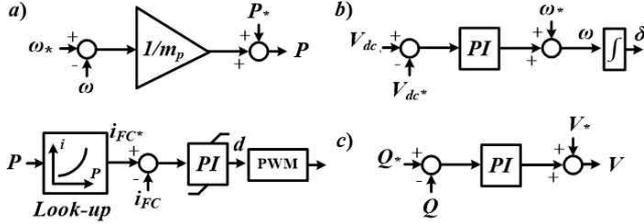


그림 3 a) 컨버터 제어기, b, c) 인버터 제어기

PEM 연료전지 스택의 출력 전압은 다음과 같다^[3].

$$V_{cell} = V_{nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc}, \quad (1)$$

또한, 연료전지의 동특성은 가스 확산 모델을 통해 설명할 수 있으며, 이는 수소 가스 조절기에 대한 지역 통과 필터로 대응된다^[3]. 본 연구에서는 Matlab PEM 연료전지 스택 모델을 활용하여 SpeedGoat 환경에서 실시간 시뮬레이션 검증은 수행하였고, Typhoon HIL 환경에서 파워 플랜트를 구축하여 Co-Simulation (Core coupling) 방법으로 평가하였다.

2.2 계통 연계 시스템 모델

그림 2는 3상 교류 그리드포밍 인버터의 단선도를 보여주며, P_{conv} 와 P_{inv} 는 각각 PEM 연료전지 스택으로부터 나오는 전력과 계통으로 주입되는 전력을 나타낸다. 그리드포밍 인버터에서 계통으로 전달되는 전력량을 산출하기 위해서는 전압 위상차를 정의해야하고 다음과 같다.

$$\delta = \delta_{GFM} - \delta_{Grid}, \quad (2)$$

δ 는 인버터와 계통간의 전압 위상차를 나타낸다. 인버터에서 계통으로 전달되는 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{inv} = \frac{3VE}{2X_g} \sin \delta, \quad Q_{inv} = \frac{3V^2 - VE \cos \delta}{2X_g}, \quad (3)$$

V , E 는 각각 인버터와 계통의 상전압이다. X_g 는 계통의 라인 임피던스 크기를 나타내고, Q_{inv} 는 계통으로 공급되는 무효전력의 크기다. 그림 4 a) 그래프는 계통에 주입되는 유효전력을 위상차에 따라 도식화한 것이다. 또한, 연료전지의 출력과 계통으로 주입되는 전력의 차이로부터 DC 링크 커패시터의 특성 방정식을 기술할 수 있고 수식은 다음과 같다.

$$C_{dc} V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{conv} - P_{inv}. \quad (4)$$

2.3 컨버터 및 인버터 제어기

3은 프론트엔드 컨버터와 인버터의 제어기 모식도를 나타낸 것이다. 제안하는 그리드포밍 인버터의 DC 링크 전압 동기화 제어는 DC 링크 전압 변화에 따라서 인버터의 동기 주

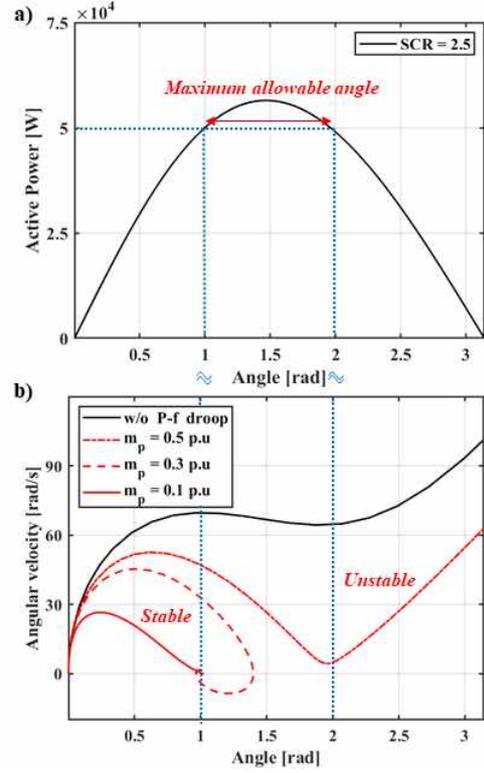


그림 4 Phase portrait - m_p 변화 안정도 분석

파수를 형성하는 것으로 커패시터 주변 전력 흐름을 나타내는 식(3), (4)의 상관관계 때문에 성립하고, 제어기 표현식은 다음과 같다.

$$\omega = \omega_* + k_{pDC}(V_{dc} - V_{dc*}), \quad (5)$$

k_{pDC} 는 DC 링크 전압 비례제어 계수를 나타낸다. 또한, 본 시스템은 송전 설비를 가정하고 계통의 라인 임피던스를 리액티브 성분으로 모델링하였기 때문에 무효전력 제어를 위해 Q-V 드롭 제어를 도입하였다. Q-V 드롭 제어 관계식은 다음과 같다.

$$V = V_* + n_q(Q_* - Q), \quad (6)$$

n_q 는 Q-V 드롭 제어 계수이다. 따라서 DC 링크 전압은 인버터가 계통 동기화를 수행하면서 활용하기에 인버터는 전압 제어에 개입하지 않고 전류제어만을 수행한다. 따라서 제어기의 성능을 더욱 높게 설계할 수 있고 연료전지와 같은 느린 동특성을 갖는 대상을 제어하기에 더 적합하다. 또한, 기존의 DC 링크 전압 동기화 제어에서 일반적으로 발생하는 문제인 저주파 진동과 제한된 그리드포밍 문제를 해결하기 위해서 인버터 동기 주파수를 기반으로 유효전력 지령을 생성하는 P-f 드롭 제어를 프론트엔드 컨버터 단에 적용했고 관계식은 다음과 같다.

$$P_{ref} = P_* + \frac{1}{m_p}(\omega_* - \omega), \quad (7)$$

P_{ref} 는 PEM 연료전지 스택의 출력을 제어하는 지령이고, m_p 는 P-f 드롭 계수이다. 그리고 연료전지 스택의 전류 제어 지령은 그림 1의 Polarization 커브 기반 Look-up 테이블을 활용하여 도출할 수 있다.

$$i_{ref} = T_{look_up} P_{ref}, \quad (8)$$

표 1 계통 연계 인버터 시뮬레이션 파라미터

FC plant (Real-time model)	S: 50 kW @ Nominal stack efficiency: 55%, operating temperature: 65°C
Front-end converter with P-f droop	f_{swc} : 50 kHz, L_b : 2 mH, C_{dc} : 1 mF m_p : 0.01 p.u., P_{ref} : 50 kW
Inverter	f_{swi} : 20 kHz, L_f : 2 mH, C_f : 25 μ F
DVSC	k_{pDC} : 0.1 p.u., $V_{dc,ref}$: 800 V
Q-V droop control	k_{pQ} : 0.02, k_{iQ} : 0.1
Grid model	Nominal frequency: 60 Hz, SCR: 3, X/R ratio: 20, L_g : 5.1 mH, R_g : 0.096 Ω

2.4 과도응답 안정도 분석

인버터 동기 주파수 기반 P-f 드롭 제어의 댐핑 효과를 증명하기 위해서 그리드포밍 인버터 계통 연계 모델의 과도응답 안정도 분석을 수행하였다. 수식 (4), (5) 및 (7)를 정리하여 시스템의 동특성을 나타내는 이계 비선형 상미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{k_p}{J_{DC}} \left(P_0 - \frac{1}{m_p} \frac{d\delta}{dt} - \frac{3VE}{2X_g} \sin\delta \right), \quad (9)$$

식 (9)의 비선형 미분방정식의 해는 일정한 시간 범위에서 초기값을 설정하여 수치해석적 방법으로 도출하였다. 그림 4 b) 그래프는 드롭 계수 m_p 의 변화에 따라서 시스템의 댐핑 정도를 나타내는 Phase portrait 해석이다. 시스템이 Under damping 된 상태에는 위상차 변화 정도가 Maximum allowable angle을 초과하여 불안정한 상태가 되고, 0.3 p.u 이상의 상대적으로 높은 드롭 계수 상황에서는 시스템이 Over damping 되어 안정적으로 동작하는 것을 예상할 수 있다.

2.5 Real-time 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 시스템과 제어기는 실시간 시뮬레이션을 통해서 검증하였다. PEM 연료전지 스택 모델의 경우 Matlab simulink 모델을 활용 SpeedGoat 환경에서 구현 및 검증했고, 계통 연계형 그리드포밍 인버터 모델 및 제어기는 Typhoon HIL 환경에 구축하였다. SpeedGoat 그리고 Typhoon HIL 시뮬레이터는 코어 결합을 활용하여 연계 시뮬레이션을 진행하였고 그림 5의 결과는 2.4장 안정도 분석 결과를 검증하기 위해 프론트엔드 컨버터에 P-f 드롭 제어를 포함하지 않은 경우와 포함한 경우 제어기의 성능을 비교한 결과이다. 그림 5 a) 경우 시스템 Under damping 된 상태로 그림 4 b) 결과에서 예상한 것과 같이 발산하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 5 b) 결과는 P-f 드롭 제어가 적용되어 시스템이 Over damping 되었고, 인버터의 동기 주파수가 60 Hz에 맞춰짐에 따라서 계통으로 공급되는 파워는 1 p.u.(50 kW)로 정확하게 지령에 따라서 제어되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 6은 프론트엔드 컨버터에 P-f 드롭 제어를 적용하여 기존 DVSC 제어기의 한계인 제한된 그리드포밍 동작을 개선한 결과이다. RoCoF 1Hz/s 테스트를 통해서 계통 주파수가 60 Hz에서 59.7 Hz로 바뀌었을 때 계통에 주입하는 파워를 0.5 p.u 더 증가시키면서 계통의 주파수 변화에 따라 주파수 보조 및 부하 분담을 동시에 수행하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 연료전지 기반 그리드포밍 인버터의 가스 확산 동특성을 보상하고 예비력을 증가시키기 위한 DC 링크 전압 동기화 기법을 제안하였고, 프론트엔드 컨버터에 동기 주파수 기반 P-f 드롭 제어를 통합함으로써 저주파 진동과 제한적 그

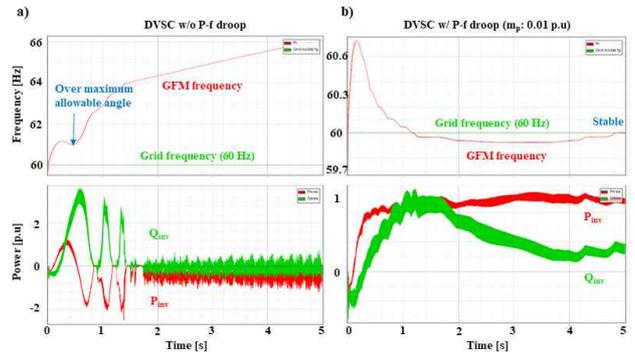


그림 5 P-f 드롭 제어 유무에 따른 주파수 동기화 결과

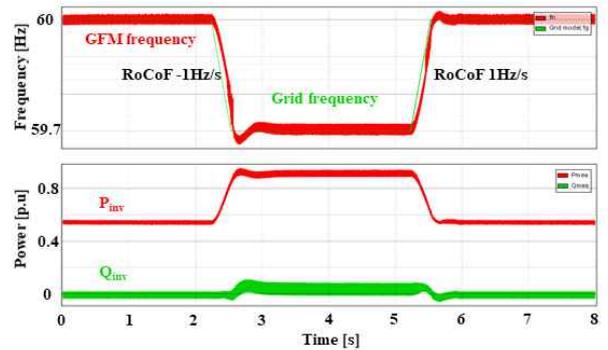


그림 6 그리드포밍 인버터 RoCoF 1 Hz/s 테스트 결과

리드포밍의 한계를 효과적으로 개선하였다. 또한, 과도응답 안정도 분석을 통해 계통 연계 시스템의 댐핑 능력을 이론적으로 분석 하였으며, 이를 실시간 시뮬레이션 HIL 환경에서 검증 및 평가하였다. 이러한 성과는 재생가능 에너지 시스템의 통합을 강화하고 그리드포밍 동작의 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

This work was partly supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (CRC23031-000) and partly supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (RS-2023-00234707-000).

참고 문헌

- [1] X. Quan, Q. Hu, X. Dou, Z. Wu, L. Zhu, and W. Li, "Control of gridforming application for fuel cell/electrolyser system," *IET Renewable Power Gener.*, vol. 14, no. 17, pp. 3368 - 3374, 2020.
- [2] L. Zhao, Z. Jin, and X. Wang, "Small-signal synchronization stability of grid-forming converters with regulated DC-link dynamics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 12, pp. 12399 - 12409, Dec. 2023, doi: 10.1109/TIE.2023.3234147.
- [3] P. T. Bankupalli, S. Ghosh, L. Kumar, S. Samanta, and S. Jain, "Operational adaptability of PEM fuel cell for optimal voltage regulation with maximum power extraction," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 1, pp. 203 - 212, Mar. 2020.