

RTDS를 활용한 그리드포밍 인버터 HILS 구현

이수연, 장푸름, 양형규, 황대연, 박상민, 김진홍[†]
 한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

Implementation of Grid-Forming Inverter HILS using RTDS

Su-Yeon Lee, Pooreum Jang, Hyoung-Kyu Yang, Dae Yeon Hwang, Sang Min Park,
 Jin-Hong Kim[†]

Korea Electronics Technology Institute Power System Research Center

ABSTRACT

전력 계통 내 인버터 기반 발전원의 비중이 증가함에 따라 계통의 관성과 안정도가 저하 문제가 대두되고 있다. 따라서 관성이 저하된 계통의 안정도를 개선하기 위한 그리드포밍 인버터가 개발되었다. 그리드포밍 인버터 기술 개발 시 테스트 단계의 시작품을 곧장 전력망에 연계하는 것은 안전상 큰 위험이 존재한다. 이에 전력 계통 및 인버터 모델을 사전 테스트할 수 있는 Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS)가 주로 활용된다. 본 논문에서는 Real-Time Digital Simulator(RTDS) 실시간 시뮬레이터를 사용하여 그리드포밍 인버터의 성능 검증을 수행하였다.

1. 서론

최근 전력 계통 내 재생에너지원의 연계가 증가함에 따라 인버터 기반 발전원들의 비중이 증가하고 기존 동기발전기의 비율이 감소하며 이로 인해 계통의 관성과 안정도가 저하되고 있다. 따라서 관성이 저하된 계통의 안정도를 개선하기 위한 그리드포밍 제어 기술이 개발되었다.^[1] 그리드포밍 인버터 기술 개발 시 테스트 단계의 시작품을 곧장 전력망에 연계하는 것은 안전상 큰 위험이 존재하므로 전력 계통 및 인버터 모델을 테스트 할 수 있는 Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS)가 주로 활용된다. Real-Time Digital Simulator(RTDS)는 고속 프로세서들을 사용한 하드웨어와 시뮬레이션을 모의하고 동작 시키는 소프트웨어(RSCAD)가 결합된 형태이며, 실시간으로 지속적인 시뮬레이션 결과를 도출할 수 있다.^[2] 본 논문에서는 RTDS 실시간 시뮬레이터를 사용하여 그리드포밍 인버터의 성능 검증을 수행하였다.

2. HILS 테스트를 위한 H/W 및 S/W 세팅

2.1 HILS 시스템 구성

RTDS를 이용한 DSP 및 회로 검증을 위해 그림 1과 같이 RTDS로 시험을 수행, 인버터 제어기를 구현하여 테스트할 수 있다. RTDS 내에 전력계통 및 인버터 파워부가 구성되어 있고 DSP에 의해 제어가 이루어지며 아날로그신호 출력장치(GTAO) 및 디지털신호 입력장치(GTDI)를 이용해 데이터들의 입출력이 이루어진다.

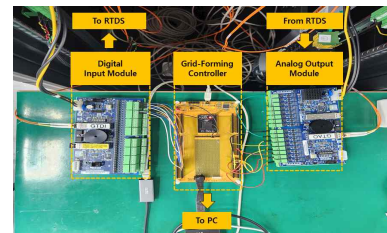


그림 1 RTDS 및 제어보드 연결 세팅
 Fig. 1 Connection settings between RTDS and control board

2.2 RSCAD 회로 구성

그림 2와 같이 RSCAD를 이용해 실제 시스템 회로를 구성하고 실시간으로 계산된 인버터 전압/전류, 계통 전압 등의 아날로그 값을 GTAO로 출력한다. DSP는 출력된 아날로그 값을 입력으로 받아 DSP 내에 설계된 전압/전류 제어기 등을 통해 계산된 PWM 파형을 GTDI를 통해 다시 RTDS의 입력으로 넣어준다. 그리드포밍 인버터의 약계통 연계 능력을 평가하기 위해 RSCAD 상에 낮은 Short-Circuit Ratio(SCR)를 구현하였다. SCR은 전력계통의 안정성을 나타내는 척도이며 수치가 클수록 전압이 안정적으로 유지된다. 약계통을 모의하기 위한 SCR은 3으로 선정되었으며, SCR의 수식은 다음과 같다.

$$SCR = \frac{S_{grid}}{P_{inv}} \quad (1)$$

$$S_{grid} = \frac{V_{PCC}^2}{Z_g} \quad (2)$$

여기서 S_{grid} 는 계통 연계지점 단락용량, P_{inv} 는 인버터 정격용량, V_{PCC} 는 계통 연계지점 전압이다. 수식을 통해 계통 임피던스 Z_g 는 약 0.31Ω으로 선정되었다.

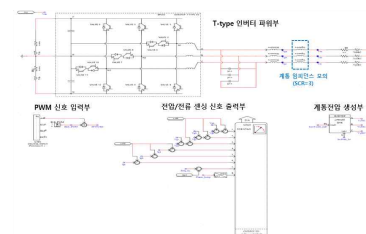


그림 2 RSCAD S/W Draft 화면
 Fig. 2 RSCAD S/W Draft screen

3. 시험 결과 및 분석

그리드포밍 인버터 성능 검증을 위해 RTDS를 활용한 시험을 진행하였다. 그리드포밍 인버터 및 계통 파라미터는 표 1에 정리하였다. 그림 3은 설계한 그리드포밍 인버터가 SCR=3의 약계통에서 원활하게 연계 및 제어 성능을 검증하기 위한 테스트 결과 파형이며, 유/무효전력 지령은 각각 인버터 출력 정격인 250kW 및 250kVAR까지 정상적인 출력이 가능하고 유/무효전력 출력 중, 전압 및 전류 파형 위상을 통해 그리드포밍 인버터 제어가 정상적으로 이루어지고 있음을 확인했다.

그림 4는 계통 주파수의 급격한 하락 상황에서 그리드포밍 인버터의 성능을 검증하기 위한 테스트 결과 파형이며, Rate of Change of Frequency(RoCoF)를 0.5Hz/s로 선정하였을 때, 그리드포밍 인버터의 정상적인 가상 관성 제어를 확인했다. 계통 주파수가 60Hz에서 59.75Hz까지 0.5Hz/s의 RoCoF로 하락하였으며, 이때 그리드포밍 인버터는 계통사고 즉시 유효전력을 출력하며 반응하였다. 정상상태 유효전력은 154.5kW로 측정되었으며, 계통 주파수의 급격한 변화에도 그리드포밍 인버터 출력은 빠르게 안정됨을 확인했다.

그림 5는 계통 전압 위상이 순시 변화할 때 그리드포밍 인버터의 관성 응답시간을 검증하기 위한 테스트 결과 파형이며, 계통전압 위상을 순시 변화시켜, 그리드포밍 인버터의 유효전력이 5ms 이내에 유의미한 출력 값을 보이는 것을 확인하였다.

그림 6은 계통 전압에 phase jump가 발생한 상황에도 그리드포밍 인버터가 탈락되지 않고 연계를 유지하는 성능을 검증하기 위한 테스트 결과 파형이며, phase jump 발생 직후 그리드포밍 인버터는 유효전력 제어를 통해 정상상태로 빠르게 복귀하며 안정적으로 계통 연계를 유지할 수 있음을 확인했다.

표 1 그리드포밍 인버터 및 계통 설계 파라미터
Table 1 Design parameters of grid-forming inverter and target grid

Parameter	Value	Parameter	Value
Topology	3-phase T-type inverter	Output Stage Filter	LCL Filter
Rated Power	250 [kW]	Grid Impedance	0.31 [Ω]
Input Rated Voltage	1000 [Vdc]	Grid Nominal Voltage	480 [Vrms]
Input Rated Current	250 [A]	Grid Nominal Frequency	60 [Hz]

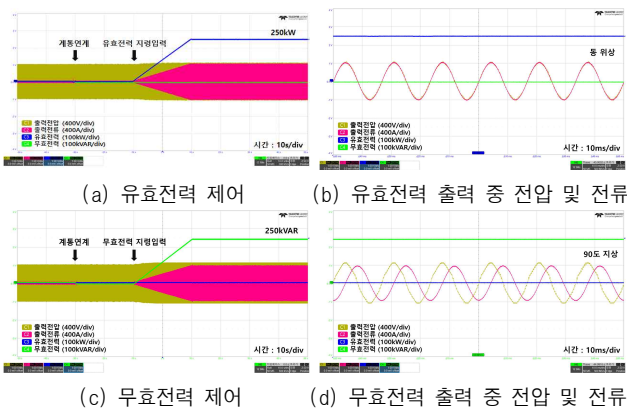


그림 3 최소 한계 SCR 시험 결과
Fig. 3 Test results for minimum SCR

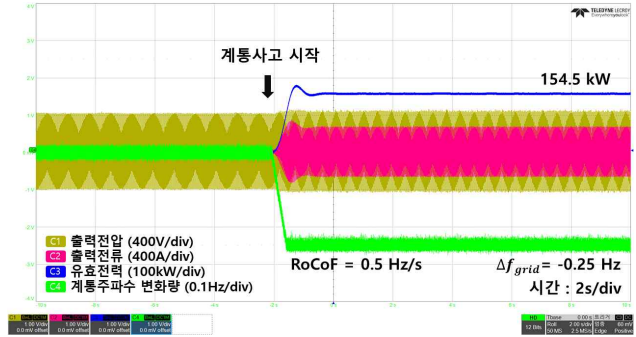


그림 4 급격한 주파수 하락 시험 결과
Fig. 4 Test results for rapid frequency drop

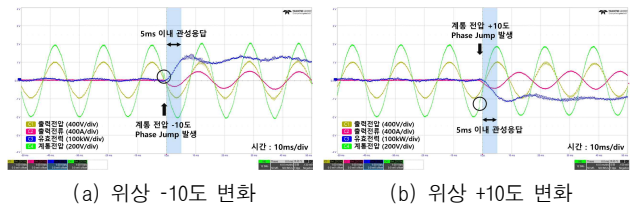


그림 5 관성 응답시간 시험 결과
Fig. 5 Test results for inertial response time

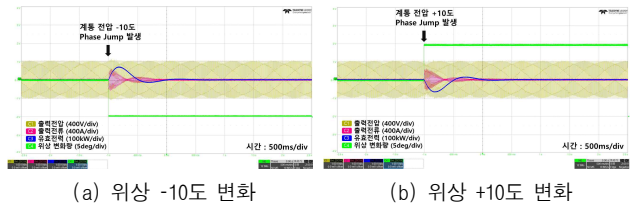


그림 6 계통전압 phase jump 시험 결과
Fig. 6 Test results for grid voltage phase jump

4. 결론

본 논문에서는 그리드포밍 인버터가 RSCAD로 모델링 되었고 실제 제어기인 DSP와 연계 운전을 시험하는 HILS를 구축하고 시험을 통해 성능을 검증하였다. 이와 같이 RTDS를 이용하여 실시간으로 시스템을 시험할 경우 계통에 일어날 수 있는 여러 가지 상황을 사고 위험 없이 테스트 할 수 있으며 다양한 알고리즘 적용하여 시스템의 안정성과 성능을 평가할 수 있다.

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

참고 문헌

- [1] 황성철, "계통 임피던스 변동에 따른 그리드포밍 컨버터 안정 제어기법." 대한전기학회 학술대회 논문집, 2023, pp.144-145.
- [2] 김승탁, 강병관, 이성찬, 박정욱, "RTDS를 이용한 배터리충방전용 양방향 DC-DC 컨버터 시뮬레이션 테스트." 대한전기학회 학술대회 논문집, 2013, pp.510-511.