

2MW 모듈형 그리드 포밍 인버터의 구현 및 검증

김현준¹, 신은석¹, 이진규¹, 김재혁²
 효성중공업(주), 효성(주)

Implementation and Validation of a 2MW Modular Grid Forming Inverter

Hyunjun Kim, EunSuk Shin, Jingyu Lee, Jaehyuk Kim
 Hyosung Industries, Co., Ltd¹, Hyosung, Co., Ltd²

ABSTRACT

효성중공업(주)은 재생에너지의 급격한 증가에 대응하여 계통운영의 안정성을 확보하기 위해, 주파수 안정화와 출력 변동성 완화 기능을 갖춘 ESS용 2MW 모듈형 PCS를 개발하였다. 2MW PCS는 333kW급 모듈 6개로 구성되어 있고 제어 방식은 그리드 팔로잉 방식이다. 그리드 팔로잉 방식은 그리드 서포팅 기능이 포함이 되어있지만 인버터 기반 발전원 (Inverter Based Resource, IBR)의 증가로 인한 계통 안정도 저하 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다. 이에 대한 해결책으로, 그리드 포밍(Grid Forming, GFM) 인버터에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 그리드 팔로잉 인버터의 소프트웨어 업데이트를 통해 그리드 포밍 인버터로 구현하고, 이를 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 및 하드웨어 실험을 진행하였다.

1. 서 론

전통적인 전력 계통은 석탄, 천연 가스, 원자력 및 수력 등의 자원을 활용한 동기 발전기를 중심으로 운영되어 왔다. 그러나 최근 몇 년 동안은 신재생 에너지를 활용한 전력 전자 기반 인터페이스인 IBR(Inverter Based Resource)의 증가로 전력 계통의 변화가 진행되고 있다. 이러한 변화로 인해 전력 계통의 안정성 저하 문제가 발생할 수 있다. 상대적으로 용량이 작은 IBR이 주로 사용되던 초기에는 그리드 팔로잉 제어를 통해 분산 전원의 최대 용량을 계통에 공급하는 것이 주요 과제였다. 약 20년 전 IEEE 1547 규정은 계통 문제 발생 시 즉시 IBR을 계통과 분리해야 했으나, 계통 안정성을 유지하기 위한 필요성으로 그리드 서포팅 기능이 점차 발전하게 되었다.[1]

그리드 서포팅 기능이 포함되에도 불구하고 IBR의 증가는 계통 안정도 저하를 가져올 수 있는 문제점이 있다. 그리드 팔로잉은 약한 계통에서 공진이 발생할 수 있고, 기존 동기발전기로 구성된 가요 계통에서 관성이 저하되는 약 계통으로 변화된다. 이로 인해 기존 계통과의 보호 협조 부분에서 문제를 발생시킨다. 따라서 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그리드 포밍 인버터가 활발히 연구 중에 있다.[2],[3]

그리드 포밍 인버터는 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하지 않으므로 외부 전압 정보가 없어도 계통과 연결될 수 있고, 독립적으로 전원을 공급할 수 있다. 또한 기존 동기 발전기의 동작을 모방하여 계통의 신뢰성, 안정성 및 회복력을 보장할 수

있다. 영국의 National Grid ESO, 미국의 NERL, UNIFI 등 해외에서도 GFM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, GFM IBR의 필요성에 대한 공감대가 점차 형성되고 있다.

본 논문에서는 2MW 그리드포밍 인버터를 PSCAD/EMTDC로 모델링을 하고 이를 간단한 실험을 통해 하드웨어 검증을 진행하였다.

2. GFM의 구현

2.1 GFM의 드롭 제어 방식

지난 20년 동안 GFM 제어 방식은 다양한 연구와 개발을 진행하고 있다. GFM이란 선로 및 출력 임피던스 뒤에서 즉각적으로 단자 전압을 조절할 수 있는 모든 인버터 제어 방식을 말한다. GFM은 동일한 시스템 내에서 그리드 팔로잉 인버터, 그리드 포밍 인버터, 동기 발전기와 같이 공존할 수 있는 특징을 가지고 있고 이는 PLL(Phase Locked Loop)을 필요로 하지 않는 인버터 제어만을 대상으로 한다, 이로 인해 계통 전압의 위상 및 크기 정보를 필요로 하는 그리드 팔로잉 인버터와는 차이를 보인다. 단독 인버터 시스템이나 통신을 필요로 하는 다중 인버터 시스템은 GFM으로 분류하지 않는다.

원칙적으로, GFM 인버터는 그 자체의 집단 상호 작용을 통해 시스템 전압과 주파수를 조절할 수 있어야 하며, 이를 통해 확장 가능하고 분산형 AC 전력 시스템을 구현할 수 있어야 한다. 이런 점에서 동기 발전기가 그리드 포밍 인터페이스를 대표하며, 동기 발전기의 동작을 모사하는 방식이 최근에는 GFM이라 일컫는다.

본 논문에서는 GFM의 구현을 위해서 다양한 방식중 구조가 간단한 드롭 제어 방식을 적용하였다. 드롭 제어는 구조가 간단하면서도 매우 효과적이어서, 일반적인 운전 중에는 동기화를 위해 추가적인 장치가 필요 없는 장점이 있다. 드롭 제어는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ω^* 는 인버터 출력 주파수 지령치, ω_n 은 정격주파수, L_f 는 유효전력 드롭계수, P_m 은 측정된 순시 전력 그리고 P^* 는 유효 전력 지령치이다.

$$\omega^* = \omega_n - D_f(P_m - P^*) \quad (1)$$

식(1)을 블록도로 표현하면 그림 1과 같다. 드롭제어는 일반적으로 관성을 모의하지 않는다. 하지만 측정된 순시 유효전력에 LPF를 취하게 되면 실제 관성 및 댐핑을 지닌 동기발전기와 같이 유사한 특성을 나타낼 수 있다.[2]

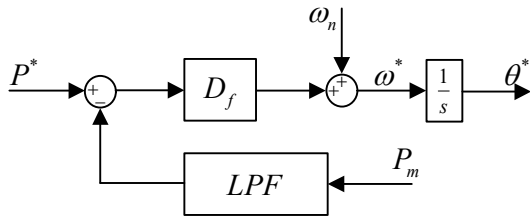


그림 1 p-f 드롭 제어 블록도

Fig. 1 Block diagram of p-f droop controller

2.2 PSCAD/EMTDC모델링

본 논문에서는 GFM인버터 검증을 위해 PSCAD/EMTDC시뮬레이션툴을 사용하여 그림 2와 같이 모델링을 진행하였다. 인버터 토폴로지는 NPC type 3레벨 구조이고 각각의 모듈라 인버터의 용량은 333kW급 6대로 총 2MW급으로 구성을 하였다.

그림 3은 주파수 변화에 따른 드롭 제어의 시뮬레이션 파형을 보여준다. 드롭계수는 6대의 모듈라 인버터 모두 동일하게 1Hz/p.u로 설정하였으며, 계통의 주파수를 0.25Hz씩 60Hz → 59Hz로 스텝으로 변경을 하면서 GFM의 유효전력 출력 파형을 확인하였다.

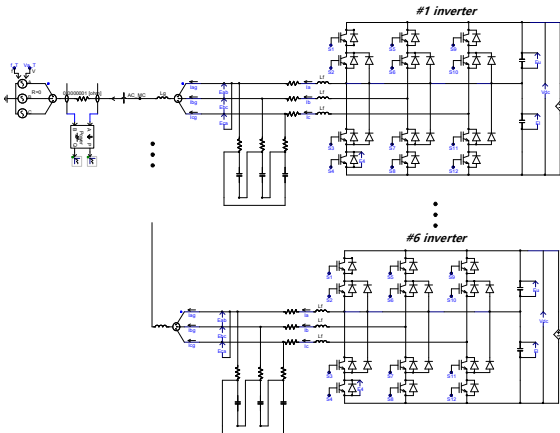


그림 2 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델링

Fig. 2 PSCAD/EMTDC Simulation Modeling

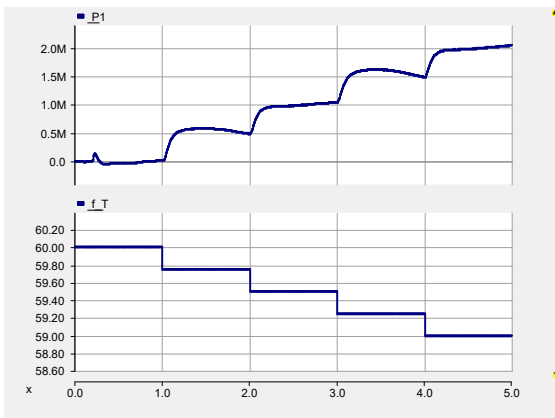


그림 3 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 파형

Fig. 3 Simulation results of PSCAD/EMTDC

계통 주파수의 스텝 변화에도 불구하고 각각의 모듈라 인버터는 드롭계수에 의해 설정된 유효전력을 공급하고 과도상태에서도 안정적인 모습을 보여준다. 이를 통해 드롭 제어를 지닌 GFM의 시뮬레이션 검증을 확인할 수 있다.

3. GFM의 하드웨어 검증

본 논문에서는 앞서 설명한 대로 GFM 인버터의 검증을 위해 (주)효성중공업에서 기존에 주파수 조정용으로 개발한 그리드 팔로잉 방식의 2MW PCS를 사용하였다. 그림 4는 실제 2MW ESS 모듈라 PCS의 외형을 보여주고 표 1은 2MW 모듈라 PCS의 사양이다. 2MW PCS는 333kW 급 모듈라 인버터 총 6대가 병렬 구조로 구성되어 있다.

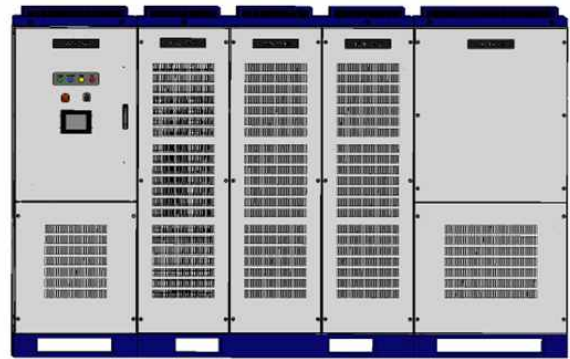


그림 4 2MW Modular PCS의 외형도

Fig. 4 Hardware of 2MW Modular PCS

표 1 2MW급 모듈라 PCS 사양

Table 1 Specifications of the 2MW modular PCS

구분	항 목	정 격
DC	입력 전압	750~1100V _{dc}
	입력 전류	2667A _{dc}
	DC 차단기	1500V, 3000A, 45kA
AC	정격 용량	2MW
	출력전압	3φ AC 440V
	정격 주파수	60Hz
	AC 차단기	520V, 3000A, 65kA
	왜형율	5%이하(개별3%이하)
	효율	95%이상

GFM 인버터의 성능 및 기능을 검증하기 위해서는 실제 2MW급 동기발전기로 구성을 하면 이상적이다. 하지만 현실적으로 시스템 환경을 구축하기 어려움이 있어 동일 제품을 추가로 드롭제어, 주파수, 전압을 가변 할 수 있는 시뮬레이터로 개발하였다. 또한 해당 시뮬레이터는 기존 그리드 팔로잉 방식의 제품들이 UL 1741 SA 인증에 필요한 LVRT, FRT, Q/V, F/W와 같은 기능들을 포함한다. 실제 해당 시뮬레이터를 가지고 UL 인증을 취득하였기 때문에 추후 그리드 포밍 인버터의

유닛 레벨의 기능 검증을 위해 충분히 활용 가능할 것으로 보인다.

그림 5는 실제 2MW 그리드포밍 인버터를 시험하기 위한 시뮬레이터 시험 환경을 보여준다. 그림 중앙의 PCS는 시뮬레이터의 용량 여유를 주기 위해 333kW급 모듈라 인버터를 1개 더 추가하였다.



그림 5 GFM인버터의 시험 환경 구축
Fig. 5 Experimental setup of GFM inverter

그림 6은 기능 검증에 사용된 실제 GFM 인버터를 보여준다. 기존의 그리드팔로잉 제어를 지닌 2MW급 PCS와 동일하며 소프트웨어만 변경을 진행하였다.



그림 6 2MW급 GFM인버터
Fig. 6 2MW GFM inverter

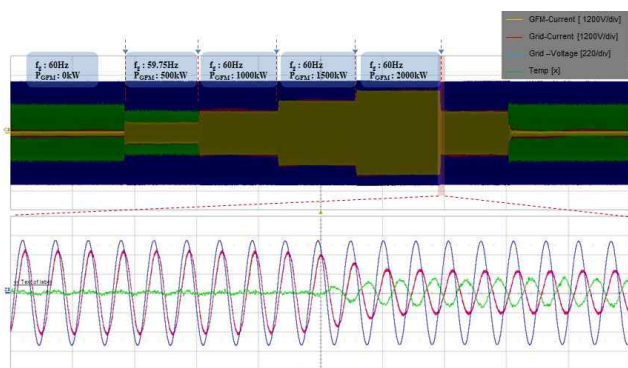


그림 7 GFM 인버터의 시험 파형
Fig. 7 Experimental results of 2MW GFM inverter

그림 7은 GFM 인버터의 시험 파형을 보여준다. 시험은 간단하게 GFM 인버터의 성능을 확인하고 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위해 동일한 조건에서 진행하였다. 드롭계수는 시뮬레이션과 동일하게 1Hz/p.u로 설정하여 59Hz에서 최대 유효전력이 발생하도록 하였다. 시험은 약 10초 간격으로 시뮬레이터

의 주파수를 0.25Hz씩 60Hz → 59Hz로 스텝으로 변경을 하면서 GFM의 유효전력 출력 파형을 확인하였다.

그림 7의 하단 파형은 스텝 변화에 대한 유효전력 출력응답이 안정적으로 공급하는 것 볼 수 있으며 전류 THD 역시 3% 미만으로 나오는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 효성중공업(주)에서 개발한 그리드 팔로잉 제어 기능을 수행하는 PCS를 이용하여, GFM 기능을 구현하고 검증할 수 있는지에 대한 연구를 수행하였다. GFM 기능을 구현하기 위해 첫 단계로, 개별 유닛 레벨에서의 기능 검증이 가능한 GFM 시뮬레이터를 개발하였다. 이 시뮬레이터를 사용하여 GFM의 기본적인 기능을 검증하는 작업을 진행하였다. 구현 및 검증결과 안정적인 동작을 수행하는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 GFM의 성능 검증은 단지 개별 유닛 레벨의 기능 검증에서만 이루어지는 것이 아니다. 전력 계통 전체의 안정화에 기여하는 상위 시스템의 통합적인 분석도 필요하며 특히, 최근에는 해외에서 다양한 연구 결과를 통해 GFM의 다양한 기능을 권장하며 표준화 작업을 진행하고 있습니다. 따라서, 이 논문을 시작점으로 하여, 해외의 다양한 요구사항을 충족시킬 수 있는 GFM 인버터에 대한 추가적인 연구를 계획하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Matevosyan et al., "Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration?," IEEE Power Energy Mag., vol. 17, no. 6, pp. 89 - 98, Nov./Dec. 2019.
- [2] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734 - 4749, Nov. 2012.
- [3] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu and S. Engelken, "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review," in IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 2, pp. 93-109, 2021,
- [4] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines classification of implementation and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," in Proc. IEEE PowerTech, 2013, Grenoble, France, Jun. 2013, pp. 1 - 7..