

그리드 포밍 컨버터의 전류 제한을 통한 FRT 제어 전략

박가영, 최성휘
서울대학교

Current Limiting FRT Strategy of Grid-Forming Converter

Gayoung Park, Shenghui Cui
Seoul National University

ABSTRACT

그리드 포밍 컨버터는 신재생 에너지 기반 발전원의 증가로 계통의 단락비가 저하되는 상황에서 안정적인 운전이 가능하여 이에 관해 많은 연구가 이루어지고 있다. 그리드 포밍 컨버터는 전압원 행동 특성으로 인해 계통 내 고장 발생시 과전류를 발생시키는 문제점이 존재한다. 본 논문에서는 계통 사고 상황에서 그리드 포밍 컨버터의 출력 전류를 제한하는 FRT (Fault Ride Through) 제어 전략을 제안하였다. 제안된 전략의 효과를 전류 제한 성능 및 사고 복구 시 정상 동작 회복 특성의 관점에서 분석하였으며, HILS 실험을 통해 FRT 제어 전략의 타당성을 검증하였다.

제안한 기법은 시뮬레이션과 Hardware-in-the-Loop (HILS) 실험을 통해 검증하였다.

2. 그리드 포밍 컨버터의 출력 전류 제한 기법

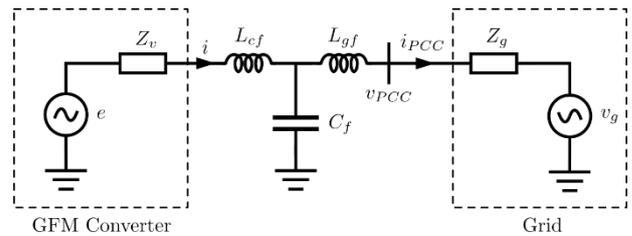


그림1 그리드 포밍 컨버터와 계통의 등가 회로 모델
Fig.1 Simplified equivalent circuit model of grid-forming converter connected to the power grid

1. 서 론

신재생에너지 기반 분산 전원의 증가로 전력 계통을 구성하는 전력전자 컨버터의 비중이 점차 증가하는 추세이다. 이에 따라 계통의 SCR (Short Circuit Ratio)이 감소하고 계통이 약화하는 현상이 발생하고 있다. 그리드 포밍 (Grid-Forming) 컨버터는 동기발전기의 동특성을 모사하여 기존의 그리드 팔로잉 (Grid-Following) 컨버터와 달리 PLL (Phase-Locked Loop)에 의존하지 않고 계통과 동기화하여 전력 계통 시스템의 전압과 주파수를 지탱하는 전압원으로 동작할 수 있어 계통이 약화하는 상황에서도 안정성을 잃지 않고 전력을 공급할 수 있다는 장점이 있다.

전력 계통에 선간 단락과 같은 사고가 발생할 경우 계통에 연결된 동기 발전기 및 계통 연계 컨버터는 계통 전압의 유지를 위해 계통으로부터 요구되는 계통 연계 규정 (Grid Code)를 만족해야 한다. 계통에 순시전압강하가 발생한 경우 동기발전기는 5-7 p.u.의 과전류 주입이 가능하나, 그리드 포밍 컨버터의 경우 반도체소자의 작동 한계로 인해 1.2-2 p.u.의 과전류 주입만이 허용된다.^[1] 따라서 계통 사고 상황에서 요구되는 FRT (Fault Ride Through) 규정을 만족하기 위해 컨버터의 출력 전류를 규정치 이내로 제한하는 제어 기법이 필요하다. 그리드 포밍 컨버터는 사고 시 계통에 요구되는 무효 전류를 주입해야 하며, 사고 복구 시 기존 정상 상태 동작을 빠르게 회복하여 유효 전력을 공급할 것이 요구된다.

본 논문에서는 그리드 포밍 컨버터의 출력 전류 벡터의 크기를 제한하여 컨버터의 제약 조건을 만족시키는 계통 사고 상황에서의 제어 전략을 제시한다. 또한 순시전압강하의 전압 경계에 따라 유효 및 무효 전력 지령을 조절하여 사고 복구 후 빠른 회복 특성을 확보할 수 있는 제어 알고리즘을 제시한다.

그림1은 전력 계통에 연결된 그리드 포밍 컨버터를 등가 회로 모델로 표현한 것이다. 컨버터의 가상 임피던스와 필터 임피던스를 포함하여 등가 임피던스 Z_e 로 나타낼 경우 그리드 포밍 컨버터의 출력 전류는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I = \|i\| = \frac{\|e - v_{PCC}\|}{\|Z_e\|} \quad (1)$$

계통의 공통접속점 (Point of Common Coupling, PCC)에서의 전압이 순시적으로 강하하거나 위상이 변화하는 경우 식 (1)의 분자가 증가하여 결과적으로 전류 I 가 컨버터의 과전류 허용치를 넘어설 수 있다. 따라서 계통 사고 상황에서 그리드 포밍 컨버터의 출력 전류의 크기를 제한할 것이 요구된다.

2.1 전류 지령 벡터의 크기 제한

그리드 포밍 컨버터의 제어는 그림2와 같이 가상 동기발전기 모의를 통해 계통과의 동기를 유지하고 유효 및 무효 전력 지령을 추종하는 외부 제어 루프 (Outer-Loop)와 바깥 제어기가 생성한 전압 및 전류 지령을 추종하는 내부 제어 루프 (Inner-Loop)로 구성된다. 외부 제어 루프와 가상 어드미턴스 (Virtual Admittance)로부터 계산된 전류 지령은 전류 제한기에 의해 컨버터의 최대 허용 과전류를 넘지 않도록 제한된 뒤 전류 제어기의 입력으로 보내진다.

본 논문에서는 전류 제한을 위해 그림3과 같이 동기좌표계 상에서 전류 지령 벡터의 크기를 제한하는 방법을 사용하였다. 지령 벡터의 크기 제한은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

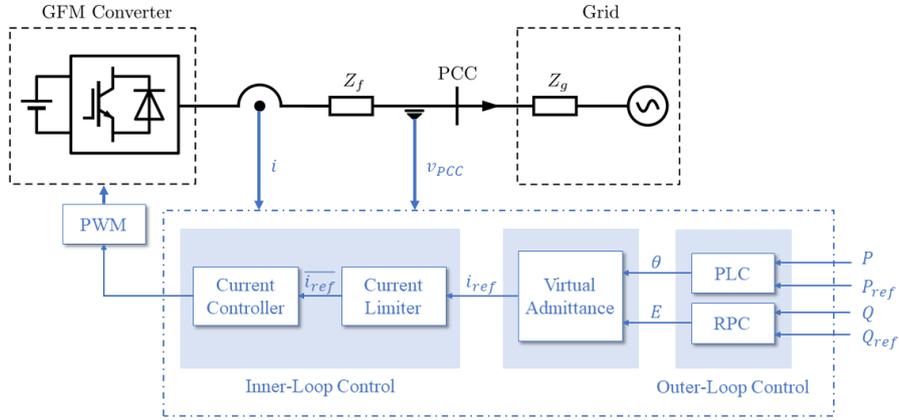


그림2 그리드 포밍 컨버터의 제어 다이어그램
Fig.2 Control diagram of a GFM Converterd-forming converter with current limiter

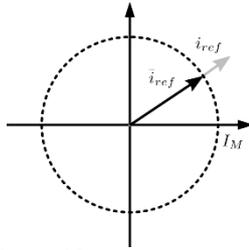


그림3 전류 지령 벡터의 크기 제한
Fig.3 Illustration of magnitude limiter

$$\overline{i_{ref,dq}} = \begin{cases} i_{ref,dq}, & I_{ref,dq} \leq I_M \\ \frac{I_M}{I_{ref,dq}} i_{ref,dq}, & I_{ref,dq} > I_M \end{cases} \quad (2)$$

$I_{ref,dq}$ 는 기존의 전류 지령 벡터의 크기, I_M 은 컨버터 출력 허용 과전류의 최대값으로 통상 1.2-2p.u.의 값을 사용한다. 동기좌표계 상의 전류 지령 벡터가 반지름 I_M 인 원을 벗어나는 경우 전류 지령 벡터는 전류제한 원에 의하여 포화된다.

2.2 유효 및 무효 전력 지령 조정

계통 사고 시 내부 제어 루프의 지령이 제한되는 경우 가상 동기발전기를 모의하는 외부 제어 루프는 느린 동특성에 의해 기존의 전력 지령에 해당하는 출력을 내지 못하여 제어기의 포화 현상(Wind-up)이 발생한다.^[2] 이는 사고 이후 정상상태 운전 특성을 회복하는 데에 악영향을 미치고 계통 연계 규정을 만족하지 못하는 원인이 된다. 계통의 공통접속점 전압이 하락했을 때 계통에 공급되는 순시 피상전력 지령의 크기를 그대로 유지할 경우 외부 제어 루프는 해당 전력 지령을 추종하기 위해 더 큰 전류 지령을 발생시킨다. 이는 전류 지령의 크기를 제한했을 때 제어기의 포화 현상(Wind-up)으로 이어지게 되므로, 순시 피상전력의 크기를 계통 사고 시 전압의 강하분에 비례하여 감소시켜야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 계통 사고 시 계통의 전압 강하를 감지하여 유효, 무효 전력 지령을 조정하여 전류 제한과 병용함으로써 그리드 포밍 컨버터의 FRT 성능을 개선하는 방안을 제안한다. 계통의 3상 대칭적 순시전압강하 사고를 가정하는 경우 계통의 공통접속점 전압은 정상분만을 가지므로 아래의 식 (3)과 같이 계통 사고 동안의 새로운 정격 피상전력을 계산할 수 있다.

$$S_{new} = V_{pu} S_n \quad (3)$$

$$Q_{ref} = \begin{cases} Q_{droop} & \text{if } V_{pu} > 0.9 \\ 2S_{new}(1 - V_{pu}) & \text{if } 0.5 < V_{pu} < 0.9 \\ S_{new} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{ref} = \sqrt{S_{new}^2 - Q_{ref}^2} \quad (5)$$

식 (4)와 같이 전압강하분에 따라 사고 시 무효전력 지령을 생성하고 식 (3), (4)로부터 유효전력 지령을 도출하여 외부 제어 루프의 유효전력제어기(PLC, Power Loop Controller)와 무효전력제어기(RPC, Reactive Power Controller)의 지령 값을 변화시킴으로써 전류제한 시의 제어기 포화 현상을 완화하고 사고 시 동특성을 개선할 수 있다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 HILS(Hardware-in-the-Loop)를 이용하여 계통의 3상 순시전압강하 사고 상황을 모의하여 전류 제한 및 유효/무효전력 지령 조정 제어의 성능을 확인하였다. 실험을 위한 하드웨어 구성은 그림4와 같으며, 실험에 사용된 컨버터의 주요 파라미터는 표1과 같다.

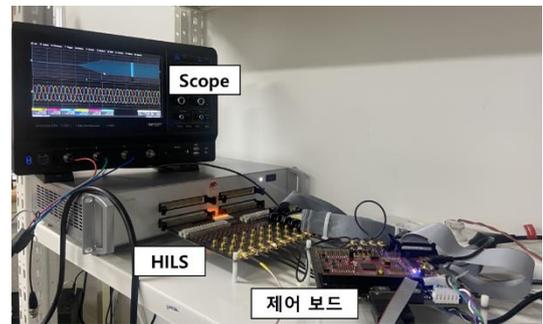


그림4 HILS를 이용한 실험 하드웨어 구성
Fig.4 Hardware simulation setup for HILS

전류 제한을 적용하지 않은 경우 그리드 포밍 컨버터는 최대 2.8p.u.의 과전류를 발생시키는 반면, 전류 지령 벡터의 크기 제한을 통해 과전류의 크기를 1.2p.u. 이내로 제한할 수 있음을 확인하였다. 유효 및 무효전력 지령을 함께 조절한 경우 그림5의 (c)에서 볼 수 있듯이 정상상태 동작 회복 시간에

1.7초가 소요되어 전류 지령 벡터의 크기만을 제한한 경우 (b)의 4.3초에 비해 훨씬 빠른 사고 회복 특성을 나타내었다. 표 1 주요 시스템 파라미터

Table 1 Values of the system parameters

Rated Power	250 kW
DC Voltage	1100 V
Grid Voltage	690 V (line-line rms)
Filter Inductance	300 μ H
Filter Capacitance	40 μ F

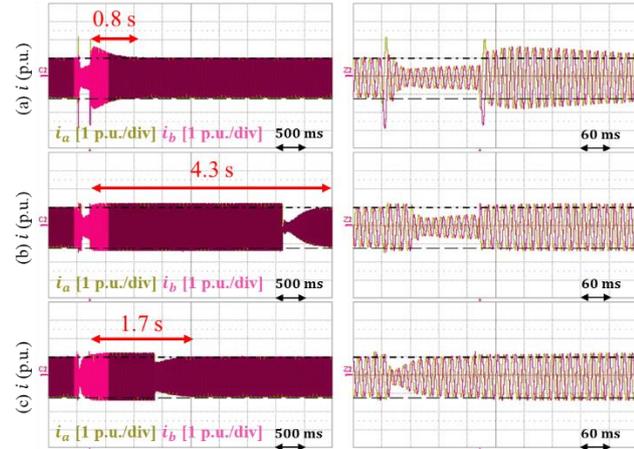


그림5 컨버터 출력 전류: (a) 전류 제한이 없는 경우; (b) 전류 지령 벡터의 크기만을 제한한 경우; (c) 전류 지령 벡터의 크기 제한 및 유효 및 무효전력 지령을 조정한 경우

Fig.5 Output current of converter: (a) without current limiting; (b) current magnitude limiter applied only; (c) current magnitude limiter along with power reference modification applied

그림6을 통해 유효 및 무효전력 지령 조정을 적용한 경우 컨버터의 출력 유효, 무효 전력 지령이 3상 순시전압강하분에 따라 조정되는 것을 확인할 수 있다. 전류 지령 벡터의 크기를 제한하는 경우 그림7의 전류 지령 벡터의 크기와 같이 전류제한에 의한 포화 현상(Wind-up)이 발생하며, 이러한 제어기의 포화 현상은 유효 및 무효전력 지령을 함께 조정함으로써 완화할 수 있다. 또한 유효 및 무효전력 지령을 함께 조정하는 경우 전류 제한만을 적용한 경우에 비해 가상동기발전기 운전 주파수가 계통과 빠르게 동기화됨을 볼 수 있다. 이처럼 전류 지령 벡터의 크기 제한 및 유효, 무효전력 지령 조정을 통해 사고 복구 동특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

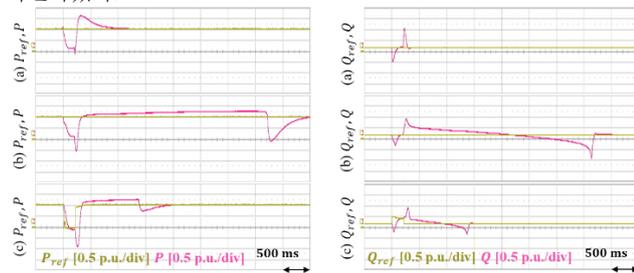


그림6 컨버터 출력 유효전력 및 무효전력: (a) 전류 제한이 없는 경우; (b) 전류 지령 벡터의 크기만을 제한한 경우; (c) 전류 지령 벡터의 크기 제한 및 유효 및 무효전력 지령을 조정한 경우

Fig.5 Output active and reactive power of converter: (a) without current limiting; (b) current magnitude limiter applied only; (c) current magnitude limiter along with power reference modification applied

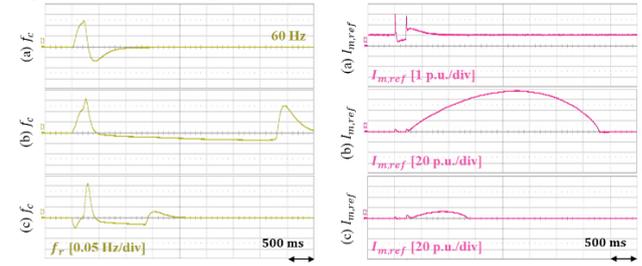


그림7 컨버터의 가상동기발전기 운전 주파수 및 전류 지령 벡터의 크기: (a) 전류 제한이 없는 경우; (b) 전류 지령 벡터의 크기만을 제한한 경우; (c) 전류 지령 벡터의 크기 제한 및 유효 및 무효전력 지령을 조정한 경우

Fig.7 Frequency of virtual synchronous generator and magnitude of current reference vector of converter: (a) without current limiting; (b) current magnitude limiter applied only; (c) current magnitude limiter along with power reference modification applied

4. 결론

본 논문에서는 계통 사고 상황에서 그리드 포밍 컨버터의 FRT를 위한 전류 제한 기법을 제안하였다. 그리드 포밍 컨버터의 전류 지령 벡터의 크기를 제한하였으며, 전류 제한에 의해 제어 루프 상에서 발생하는 제어기의 포화 현상을 완화할 수 있는 유효전력 및 무효전력 지령 조정 방안을 함께 제안하였다. HILS 실험 결과를 통해 제안된 그리드 포밍 컨버터의 사고 시 전류 제한 제어 기법이 3상 순시전압강하 상황에서 전류 제한에 관한 계통 연계 규정을 만족시키며, 전력 지령의 조정을 통해 전류 제한에 따른 사고 복구 동특성을 개선하여 시스템의 안정도를 확보함을 확인하였다.

이 논문은 2023년도 BK21 FOUR 정보기술 미래인재 교육연구단에 의하여 지원되었음

참고 문헌

[1] B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, "A Review of Current-Limiting Control of Grid-Forming Inverters Under Symmetrical Disturbances," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, pp. 955-969, 2022.

[2] M. G. Taul, X. Wang, P. Davari and F. Blaabjerg, "Current Limiting Control With Enhanced Dynamics of Grid-Forming Converters During Fault Conditions," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1062-1073, June 2020.