

전류 제한 구간 벡터 다이어그램을 통한 그리드 포밍 인버터의 전압 변동성 해석

이유진, 공임보, 채수용
포항공과대학교

Analysis of Voltage Variation of GFM Inverters in the Current Limiting Region Using Vector Diagrams

Youjin Lee, Imbo Kong, Suyong Chae
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

그리드 포밍(GFM) 인버터는 계통 고장 상황 발생 시 인버터 출력 전류가 과도하게 증가할 수 있기 때문에 전류 제한 기능의 구현이 매우 중요한 요소이다. 전류 제한 기능의 구현을 위해 전류 제한 조건에서 GFM 인버터의 출력 전압 변동 특성에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 전류 제한 구간에서의 GFM 인버터의 전압 변동 특성을 정밀하게 분석할 수 있는 벡터 다이어그램 기반 분석 방법론을 제안한다. 제안한 방법론에 기반하여 GFM 인버터의 출력 전압 변동성과 진동 범위를 분석하였으며, MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 제안 방법론의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 인버터 기반 재생에너지 분산 자원의 비중이 증가함에 따라, 동기 발전기(SG)의 인버터 대체 필요성이 증대되고 있다. 그러나 기존의 그리드 팔로잉(GFL) 인버터 방식은 위상 고정 루프를 활용하여 계통 전압을 추적하며 전류원 방식으로 동작하기 때문에, 인버터 기반 발전원 비중이 증가하게 되면 SG를 기반으로 하던 기존 전력 시스템의 안정성을 충분히 보장하지 못하게 될 수 있다.^[1] 이에 따라, 가상 동기 발전기 개념을 도입한 그리드 포밍(GFM) 인버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

GFM 인버터는 계통에서 단락이나 고장과 같은 사고로 인해 순시전압강하가 발생하였을 때 전력 반도체 소자의 허용 전류 한계 특성으로 인해 약 1.2-1.5 p.u. 정도의 과전류 공급이 가능하다. 때문에, 회로 손상을 방지하기 위해 전류 제한 제어 기능의 구현은 필수적이다.^[1]

전류 제한이 발생하면 GFM 인버터는 전압원 모드에서 전류원 모드로 전환된다. 전류 제한 구간은 계통 사고 중 및 사고 이후의 인버터 동작과 시스템 안정성, 장애 복구 능력에 결정적인 영향을 미친다.^[2] 하지만, 전류 제한 구간에서 GFM 인버터의 동적 변화 특성을 해석하는 방법론이 아직 미흡하여 전류 제한 구간에서의 GFM 인버터 출력 변화를 정확히 예측하기 어렵다. 본 논문에서는 전류 제한 구간에서 GFM 인버터와 계통의 동작을 나타내는 벡터 다이어그램을 제시하고 이를 바탕으로 전류 제한 구간에서 GFM 인버터의 출력 전압 변동 범위와 경향성을 예측하였다.

2. 본 론

2.1 일반적 GFM 인버터의 전력-위상($P-\delta'$) 곡선

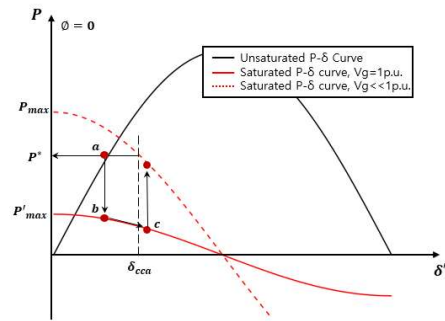


그림 1 전류 제한 구간에서의 $P-\delta'$ 곡선, $\phi = 0$
Fig. 1 $P-\delta'$ Curve in Current Limiting, $\phi = 0$

그림 1은 각도 우선(Angle Priority) 전류 제한 적용 시 GFM 인버터의 유효 전력 출력과 가상 전력각(δ')간의 관계를 계통 사고와 전류 제한 여부에 따라 표현한 것이다. GFM 인버터가 계통 고장 시 전류 제한 구간에 진입한 후 복구되는 과정을 표현하고 있으며, 각 구간에서 GFM 인버터의 동작 특성을 확인할 수 있다. 전류 제한 여부에 따른 GFM 인버터의 유효 전력 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$P = \begin{cases} \frac{V_{inv} V_g}{X_g} \sin(\delta') & \text{if } |i| < I_{inv,max} \\ V_g I_{inv,max} \cos(\delta' - \phi) & \text{if } |i| > I_{inv,max} \end{cases} \quad (1)$$

V_{inv} 는 GFM 인버터 전압, V_g 는 계통 전압, X_g 는 계통 인덕턴스, $I_{inv,max}$ 는 전류 제한 시 최대 GFM 인버터 전류, ϕ 는 전류 잠초 각도이다. GFM 인버터의 기본 제어 방식은 P-f 드롭(Droop) 제어를 사용한다. 계통이 정상 상태일 때 GFM 인버터는 동작점 a에서 정격 출력 P^* 를 유지하나, 순시전압강하로 인해 전류 제한이 발생하면 유효 전력 출력 곡선이 바뀌며 동작점 b로 이동하게 된다.^[3] 이때 Droop 제어에 의해 주파수 차이가 발생하고 이에 따라 δ' 가 가속되며 출력 전압이 급격하게 변동한다. 그러나, $P-\delta'$ 커브는 δ' 가속에 따른 전력 변화를 반영할 뿐 GFM 인버터의 전압-전류 간 상호작용을 충분히 표현하지 못하기 때문에 전압 변동성을 파악하는데 한계가 있다.

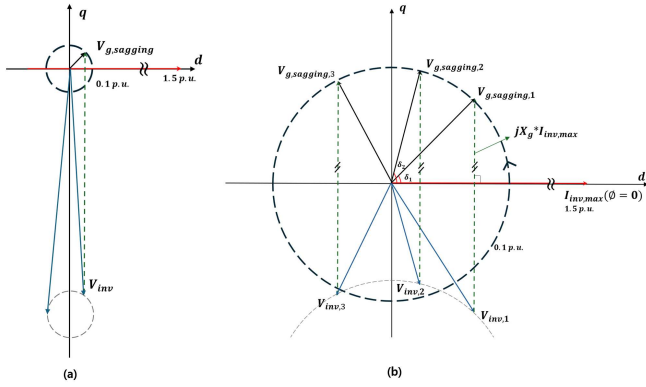


그림 2 전류 제한 구간에서의 GFM 인버터 벡터 다이어그램
(a)스케일 중심 다이어그램, (b)확대된 다이어그램
Fig. 2 GFM Inverter Vector Diagram in Current Limiting
(a)Scale Focused Diagram, (b)Magnified Diagram

2.2 전류 제한 구간 벡터 다이어그램

본 논문에서는 GFM 인버터 동작 분석의 한계를 보완하기 위해, 그림 2와 같은 벡터 다이어그램을 제안한다. 그림 2는 계통의 순시전압강하 정도가 0.1 p.u. 일 때, 제한된 전류 벡터 ($I_{inv,max}$)를 기준으로 전류 제한 구간에서의 주파수 변화 및 위상 관계를 나타낸 벡터 다이어그램이다.

전류 제한 구간에서는 드롭 제어에 의해 I_{inv} 와 V_g 간 위상 차이가 지속적으로 가속된다. 그러나 전류의 초기 위상각을 $\phi=0$ 으로 제어하여 $I_{inv,max}$ 를 d축에 정렬하면 전류의 주파수 변동 상황에서도 d-q 좌표계 상에서 V_g 와 V_{inv} 를 위상차를 기준으로 표현이 가능하다. 이때 GFM 인버터의 출력 전압은 다음과 같이 d-q축 전압 성분으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} V_{inv,d} = V_g' \cos(\delta) \\ V_{inv,q} = X_g I_{inv,max} - V_g' \sin(\delta) \end{cases} \quad (2)$$

$V_{inv,d}$, $V_{inv,q}$ 는 각각 d, q축에서의 GFM 인버터의 전압 성분을 나타내며, δ 는 전류 제한 시 발생하는 위상각이다. 이를 통해 계통 인덕턴스, 순시전압강하의 정도, 전류 제한 값을 기반으로 V_{inv} 의 크기를 계산할 수 있다. 또한 그림 2-(a)를 통해 $I_{inv,max}$ 가 충분히 큰 경우 V_{inv} , $I_{inv,max}$ 간 위상차가 약 90° 부근에서 진동하는 경향성을 보임을 예측할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 MATLAB/Simulink를 활용하여 계통의 순시 전압 강하 사고를 모의하고 전류 제한 구간에서 GFM 인버터의 동적 특성이 이론적 예측과 부합하는지 검증하였다.

그림 3-(a)의 시뮬레이션 결과를 통해 1초 시점에 계통 전압이 0.1 p.u.로 감소하는 사고가 발생하였을 때, 전류가 제한되어 1.5 p.u. 이하로 유지됨을 통해 전류 제한 기능이 정상적으로 작동함을 확인할 수 있다. 전류 제한 구간에서 GFM 인버터의 피크-피크 최대/최소 전압(V_{pp})은 식(2)에 기반하여 각각 430.6 V, 306.6 V이다. 또한, 그림 2에 기반하여 V_{inv} 와 $I_{inv,max}$ 의 위상 진동 범위 [$80.31^\circ \sim 99.69^\circ$]를 도출할 수 있다. 그림 3-(b), 3-(c)를 통해 실제 시뮬레이션의 결과가 각각 $V_{pp} : 447.4 V, 304.2 V$, 위상 진동 범위 : [$77.5^\circ \sim 96.9^\circ$]임을

표 1 주요 시스템 파라미터

Table 1 Values of the System Parameters

Grid Model	Nominal Frequency : 60Hz SCR: 5, X/R Ratio : 20, $P_{ref} : 10kW$, $V_{rms} : 220V$
DC Voltage	700V
Voltage Sagging	1 p.u. \rightarrow 0.1 p.u.
Current Limit	32A

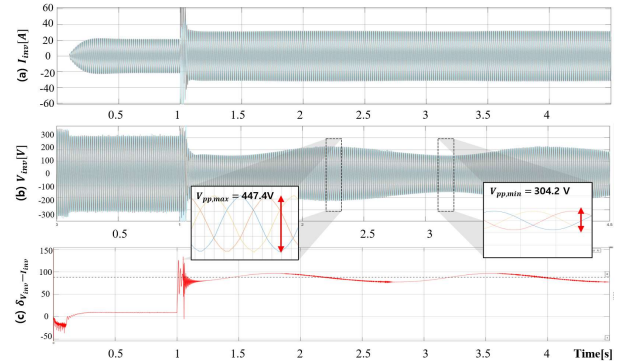


그림 3 GFM 인버터 출력 : (a) I_{inv} , (b) V_{inv} , (c) $\delta_{V_{inv}-I_{inv}}$
Fig. 3 GFM Inverter Output : (a) I_{inv} , (b) V_{inv} , (c) $\delta_{V_{inv}-I_{inv}}$

확인할 수 있고, 그 값의 오차가 각각 4%, 3.5% 이내임을 도출하여 제안하는 다이어그램의 유효성을 입증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 GFM 전류 제한 구간에서의 동작을 벡터 다이어그램을 통해 분석하고 전압 변동성을 예측하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 다이어그램이 전류 제한 구간에서 GFM의 전압 및 전류 동작과 일치함을 확인하였고, 전압의 진동 범위를 오차율 4% 이내로 추정하였다. 해당 방법론은 GFM의 안정적인 운영과 제어 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (CRC23031-000)

참고 문헌

- [1] N. Baeckeland, D. Chatterjee, M. Lu, B. Johnson and G. -S. Seo, "Overcurrent Limiting in Grid-Forming Inverters: A Comprehensive Review and Discussion," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 11, pp. 14493-14517, Nov. 2024.
- [2] B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, "A Review of Current-Limiting Control of Grid-Forming Inverters Under Symmetrical Disturbances," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol 3, pp. 955-969, 2022.
- [3] L. Huang, H. Xin, Z. Wang, L. Zhang, K. Wu and J. Hu, "Transient Stability Analysis and Control Design of Droop-Controlled Voltage Source Converters Considering Current Limitation," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 578-591, Jan. 2019