

원형 전류제한기와 가상 어드미턴스를 이용한 그리드포밍 인버터의 과전류 제한 방법

김성연, 정재정
경북대학교

Current limiting method using circular current limiter and virtual admittance of Grid-Forming Converter

Seong yeon Kim, Jae-Jung Jung
Kyungpook National University

ABSTRACT

그리드포밍 인버터는 전류원으로 동작하는 그리드 팔로잉 인버터와 달리 전압원으로 동작하기 때문에 계통 사고 시의 과전류 관리가 중요하다. 일반적으로 과전류 제한을 위해 전류제한기, 가상 임피던스, 전압제한기 등이 연구되어 있으며, 일반적으로 그 중 하나의 기법을 선정하여 적용한다. 본 논문은 그리드포밍 인버터의 과전류 방지를 위해 전류제한기만을 사용했을 때의 사고회복, 과도 안정도, 사고 시 무효전력 주입효과에 대해서 페이지도와 $P-\delta$ 곡선을 이용해 분석한다. 또한, 기존의 전류제한기에 가상 임피던스(어드미턴스) 방법을 함께 적용하는 경우, 앞에서 언급한 세가지 특성을 기준으로 효과를 비교 분석하였다.

1. 서론

세계적인 탄소중립의 대두와 신재생에너지 발전으로 매우 다양한 분산전원들이 들어오게 되고, 특히 인버터 기반의 분산전원들 (풍력, 태양광 등)의 비중이 급속도로 높아지고 있다. 기존의 인버터 기반의 전원들은 대부분 grid-following (GFL) 제어를 통해 전력 계통에 연계된다. GFL 제어 기반의 voltage source converter (GFL-VSC)의 phase-locked loop (PLL)는 약계통에서 소신호 안정도를 보장할 수 없으며, 관성 응답을 제공할 수 없다. 그러므로 PLL을 사용하지 않고 계통과 동기화하며, 동기발전기의 관성 응답을 모방하는 grid-forming 제어 기반의 voltage source converter (GFM-VSC)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 전류원으로 동작하는 GFL-VSC와 달리 GFM-VSC는 전압원으로 동작하기 때문에 계통 사고시 발생할 수 있는 과전류에 대한 관리와 고려가 매우 중요하다.

GFM-VSC의 과전류를 방지하는 다양한 방법이 소개되며 크게 대표적으로 전류제한기, 가상 임피던스, 전압 제한기로 구분한다. 대표적인 이 세가지 방법 중에 일반적으로 전압 제한기는 전압 강하사고 시 일시적인 과전류가 약 2p.u.로 크기 때문에, 본 논문에서는 상대적으로 전류제한을 확실히 이뤄내는 전류제한기와 가상 임피던스

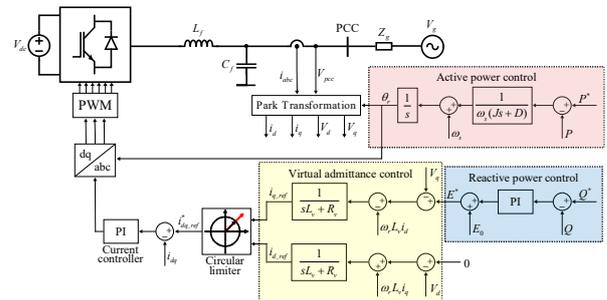


그림 1 그리드포밍 인버터의 전체적인 제어 블록도.

스 방법에 초점을 둔다^[1].

본 논문에서는 기존의 GFM-VSC의 과전류 제한을 위해 원형 전류제한기 혹은 가상 임피던스를 선택하여 적용하는 것과 달리 두 기법을 함께 적용하는 방법을 제시한다. 이 방법은 일시적인 과전류를 방지할 뿐만 아니라 빠른 사고 회복, 과도 안정도, 사고 중 무효전력 주입의 특성의 향상으로 이어진다.

2. 기존의 과전류 제한 방식

2.1 원형 전류제한기

그림 1은 그리드포밍 인버터의 전체적인 제어 블록도를 나타낸다. 그리드포밍 인버터는 전압원으로 동작하기 때문에 사고시 인버터의 전압을 유지하기 위해서 인버터 허용 전류 이상의 사고전류가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 과전류를 방지하기 위해서 식(1)의 알고리즘으로 동작하는 원형 전류제한기를 사용한다.

$$i_{ref}^* = \begin{cases} i_{ref}, & I_{ref} \leq I_{lim} \\ \frac{I_{lim}}{I_{ref}} i_{ref}, & I_{ref} > I_{lim} \end{cases} \quad (1)$$

i_{ref}^* , i_{ref} , I_{ref} , I_{lim} 는 각각 전류제한기를 통과한 전류 지령, 전류 제한 이전의 전류 지령, 전류 제한 이전의 전류 지령의 크기, 최대 허용 전류 지령 크기이다. 하지만 원형 전류제한기는 과전류를 효과적으로 제한하지만 사고 시 전류 지령의 크기를 I_{lim} 로 고정하기 때문에 외부 전력 제어 루프에 적분기의 값이 누적되는 wind-up 현상이 발생한다.

2.2 전력 지령 조절 제어

계통 사고로부터 외부 전력 제어루프에 적분기의 wind-up 현상을 완화하기 위해서 식(2) ~ (4)를 기준으로 유효전력 지령을 조절한다^[2].

$$S_{new} = V_{pu} S_n \quad (2)$$

$$Q^{**} = \begin{cases} Q^* & \text{if } V_{pu} > 0.9 \\ 2S_{new}(1-V_{pu}) & \text{if } 0.5 < V_{pu} < 0.9 \\ S_{new} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$P^{**} = \sqrt{S_{new}^2 - (Q^{**})^2} \quad (4)$$

S_{new} , S_n , V_{pu} , Q^* , Q^{**} , P^{**} 는 각각 사고시 컨버터의 새로운 용량, 컨버터의 기존 용량, PCC전압의 p.u.크기, 기존의 무효전력 지령, 새로운 무효전력의 지령을 의미한다. 이 제어 방식은 wind-up 완화뿐만 아니라 계통 사고 검출 시 유효전력 지령을 크게 감소시키므로 사고 동안에도 동작점이 존재하게 되고, 따라서 과도안정도의 향상을 가져올 수 있다.

3. 제안하는 과전류 제한 방식

3.1 사고 회복 시간 관점에서의 특성 향상

그림 2는 사고 전과 사고 직후의 GFM-VSC의 페이저도를 나타낸다. E , V_g , δ , φ 는 각각 GFM-VSC의 EMF 전압, 계통 전압, 전력각, 위상각을 의미한다. 기존의 과전류 제한 방식은 그림 2(b)와 같이 계통 사고로 인해 전류 지령이 커지지만 원형 전류 제한기가 크기를 고정시킨다. 이때 계통 사고가 회복된 직후 전류 지령은 과도 시간을 거치며 최대 허용 전류 값보다 작아지게 되며, 이는 관성을 모사하는 GFM-VSC에서 사고 회복 시간을 길어지게 한다. 뿐만 아니라 사고 회복 직후 GFM-VSC의 출력 전력의 오버슈트를 발생시킨다.

$$Z_v = \frac{\max |Ee^{j\theta} - V_{pcc}|}{I_{lim}} \quad (5)$$

$$R_v = \max \left\{ R_{vo}, \frac{Z_v}{\sqrt{\sigma^2 + 1}} \right\}, L_v = \max \left\{ L_{vo}, \frac{\sigma R_v}{\omega_s} \right\} \quad (6)$$

이러한 문제를 회피하기 위해서 식(5) ~ (6)를 기준으로 가상 임피던스의 크기를 동시에 키워 그림 2(c)와 같이 사고 중에서도 i_{ref} 와 i_{ref}^* 의 크기를 동일하게 만든다. 이는 원형 전류제한기를 사용하지 않고 가상 임피던스의 크기의 조절만을 통해 과전류 제한을 이루면 된다고 생각할 수 있다. 하지만 가상 임피던스의 크기 조절만을 이용해 과전류 제한을 한다면 사고 직후, 사고 회복 직후에 일시적인 상전류의 직류 성분으로 인해 과전류가 발생한다. 이러한 과전류로 인해 GFM-VSC의 전력반도체 스위치가 손상될 수 있다. 따라서, 제안하는 과전류 제한 방식은 사고 회복 시간의 관점에서 향상된 특성을 보인다.

3.2 과도 안정도 향상

제안하는 방법은 과도안정도를 향상시킨다. 이를 그림 3을 통해 설명하며, 설명을 위해 $A_1 = D_1$, $A_2 = D_2$ 로

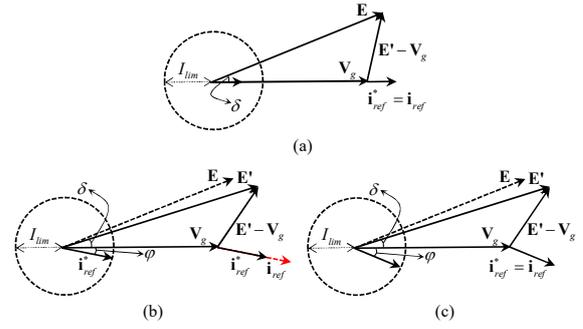


그림 2 그리드포밍 인버터의 페이저도. (a) 사고 전, (b) 사고 회복 직후의 기존 과전류 제한 방식, (c) 사고 회복 직후의 제안하는 과전류 제한 방식.

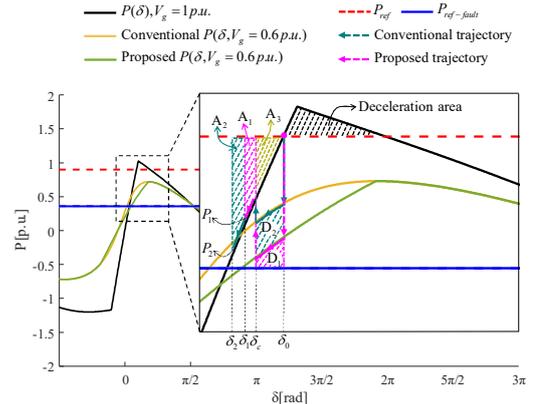


그림 3 GFM-VSC의 $P-\delta$ 곡선과 유효전력 지령

가정한다. 원형 전류제한기를 사용하는 GFM-VSC의 $P-\delta$ 곡선은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 기존의 방식을 사용하는 GFM-VSC에서 0.6p.u. 계통 전압 강하가 발생하였을 때, $P-\delta$ 곡선은 검은색의 직선으로 그려진 $P(\delta, V_g = 1)$ 곡선에서 노란색의 직선으로 그려진 conventional $P(\delta, V_g = 1)$ 곡선으로 변화하며, 식(2)~(4)에서 정해진 계산된 새로운 유효전력 지령 $P_{ref-fault}$ 로 바뀌어 인가된다. 제안하는 방법은 기존의 방법과 달리 사고 시 가상 임피던스의 크기가 초기 값에 비해 커져 초록색 직선의 proposed $P(\delta, V_g = 0.6)$ 곡선으로 나타낼 수 있다. 계통 사고가 발생하고 전력각이 δ_c 에서 사고가 회복되었을 때, 기존의 방법에서 GFM-VSC는 $D_1 + D_2$ 면적만큼 GFM-VSC의 주파수 감속으로 이어진다. 또한 전력각이 δ_c 에서 conventional $P(\delta, V_g = 0.6)$ 곡선에서 $P(\delta, V_g = 1)$ 곡선으로 변화하며, 유효전력 지령은 빨간색 점선으로 그려진 기존의 전력 지령 P_{ref} 로 변경된다. 이후 GFM-VSC가 가속 영역에 있더라도 GFM-VSC의 주파수가 공칭 주파수까지 회복하는 순간까지 전력각은 감소하게 된다. 즉 $D_1 + D_2$ 와 동일한 면적인 $A_1 + A_2$ 의 면적만큼 가속되는 순간까지 전력각이 감소하게 되며, 이때 전력각의 최저점은 그림 3의 (δ_2, P_2) 지점이 된다. 이후 GFM-VSC는 $A_1 + A_2 + A_3$ 면적만큼 가속하며 동작점으로 돌아간다.

하지만 제안하는 방법의 proposed $P(\delta, V_g = 0.6)$ 곡선은

기존의 conventional $P(\delta, V_g = 0.6)$ 곡선과 비교할 때, 전력(P) 곡선 값이 작기 때문에 전력각이 δ_c 에서 회복되는 동일한 사고임에도 불구하고 GFM-VSC의 주파수는 D_1 의 면적만큼 감소하게 된다. 사고 회복 이후 A_1 의 면적만큼 가속되는 순간까지 전력각이 감소하게 되며, 전력각의 최저점은 (δ_1, P_1) 지점이 된다. 이후 GFM-VSC는 $A_1 + A_3$ 면적만큼 가속하며 동작점으로 돌아간다. 결론적으로 검정색의 면적으로 표현된 Deceleration area는 동일한 상황에서 제안하는 과전류 제한 방식은 가속하는 면적이 A_2 만큼 줄었기 때문에 이는 GFM-VSC의 과도 안정도의 향상을 의미한다.

3.3 사고 중 무효전력 공급 기여도

전력 계통에 전압강하 사고가 발생하였을 때, 계통은 전압 안정도 유지를 위해 무효전력을 필요로 한다. 하지만 그림 3에서 볼 수 있듯이, 원형 전류제한기만을 이용하여 과전류를 제한하는 방법은 상대적으로 GFM-VSC의 계통주입 무효전력의 양을 제한한다.

$$|Q_o| = \sqrt{(I_{lim}^{pu} S_{new})^2 - P_o^2} \quad (7)$$

계통 사고 중에 출력하는 무효전력은 식(7)로 도출된다. $|Q_o|, I_{lim}^{pu}, S_{new}, P_o$ 는 각각 출력 무효전력의 크기, 최대 허용 전류의 p.u.값, 식(2)에서 정해진 GFM-VSC의 새로운 용량, 출력 유효전력을 의미한다. 그리고 이전 장에서 사고 상황에서 원형 전류제한기에 가상 임피던스의 조절까지 사용하여 전류 제한이 이루어질 때 출력 유효전력은 작아지는 것을 확인하였다. 그러므로 식(7)에 의해 계통 사고 중에 출력 무효전력이 기존 전류제한법을 적용한 경우보다 커지는 것을 수학적으로 알 수 있다.

4. 실험 결과

제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 2[kW]급 실험을 진행하였다.

그림 4은 0.6p.u. 계통 전압 하강 사고시 충분한 댐핑을 가지는 GFM-VSC의 유효전력 파형이다. 제안하는 방법을 사용하는 GFM-VSC는 사고 회복 직후 오버슈트가 감소하며, 사고 회복 시간이 0.8[s]에서 0.5[s]로 약 0.3[s] 향상된 것을 확인할 수 있다.

그림 5과 그림 6은 0.6p.u. 계통 전압 강하 사고시 부족한 댐핑을 가지는 GFM-VSC의 유효전력 파형이다. 제안하는 과전류 제한 방식을 사용하는 GFM-VSC는 사고 회복 이후 동기화를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 기존의 과전류 제한 방식을 사용하는 GFM-VSC는 가속 면적에 비해 감속 면적이 충분하지 크기 못해 동기화를 잃는다.

뿐만 아니라 계통 사고동안 0.75p.u.의 유효전력과 0.13p.u.의 무효전력을 출력하는 기존의 과전류 제한 방식과 달리 제안하는 과전류 제한 방식은 0.6p.u.의 유효전력과 0.55p.u.의 무효전력을 출력하는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 GFM-VSC의 원형 전류제한기를 사용하였을

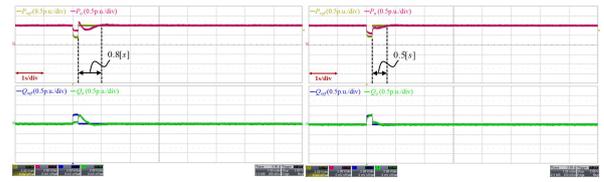


그림 4 0.6p.u. 계통 전압 하강 사고시 충분한 댐핑을 가지는 GFM-VSC의 유효전력 파형 (a) 기존의 방법, (b) 제안하는 방법

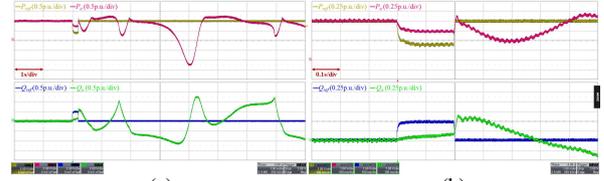


그림 5 기존의 방법에서 0.6p.u. 계통 전압 하강 사고시 부족한 댐핑을 가지는 GFM-VSC의 유효전력 (a) 전체 파형, (b) 확대 파형

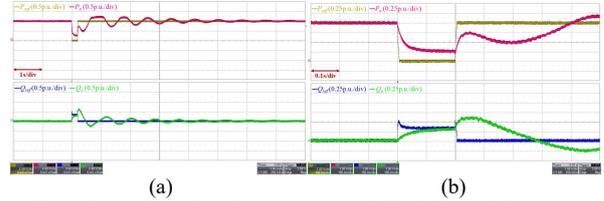


그림 6 제안하는 방법에서 0.6p.u. 계통 전압 하강 사고시 부족한 댐핑을 가지는 GFM-VSC의 유효전력 (a) 전체 파형, (b) 확대 파형

때의 문제점을 페이지 다이어그램과 $p-\delta$ 곡선을 이용해 직관적으로 분석하였다. 또한, 분석한 내용을 기반으로 원형전류제한기와 가상 임피던스 조절을 함께 사용하여 과전류를 제한할 때 사고 회복 시간, 과도 안정도, 사고 중 무효전력 주입 특성이 향상된다는 것을 밝혀냈다. 기존에는 원형전류제한기 혹은 가상 임피던스 각각의 과전류 제한 특성, 과도 안정도 등을 분석하는 연구를 진행되어오고 있지만, 이를 결합하여 같이 사용함으로써 GFM-VSC의 능력을 향상시킬 수 있다는 새로운 관점을 제공한다. 본 논문에서 제안하는 방법의 타당성은 2 kVA의 용량의 축소 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00231709, 분산에너지 계통접속 기반 그리드포밍 핵심기술 운영실증)

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," in 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," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 2, pp. 1062-1073, June 2020.