

계통강건도를 고려한 그리드포밍 인버터의 출력제한 분석 및 제어 방법

황현석, 이준희
울산과학기술원

Output Limit Analysis and Control Method of Grid-Forming Inverter Considering Grid Strength

Hyeonseok Hwang, Joon-Hee Lee
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

다수의 인버터 기반 발전원들이 전력계통에 연계됨에 따라 계통의 강건도는 저하되고 있다. 이는 그리드포밍 인버터(grid-forming inverter, GFMI)를 연계하여 계통전압의 안전성을 개선할 수 있지만, 높은 계통 임피던스와 연계되면 큰 전압강하로 인해 인버터의 출력전력이 제한되어 계통전압을 보상할 수 없게 된다. 본 논문에서는 계통강건도 지표인 단락비 (short circuit ratio, SCR)를 정의한 후, 인버터의 전압 및 전류 제한을 고려하여 출력전력 제한 영역을 도출한다. 또한, 출력제한 영역 밖에서는 유효 및 무효전력 지령을 추종할 수 없으므로, 출력전력 제한을 따라 최대 공급할 수 있는 제어 방법을 제안한다. 제안된 방법은 MATLAB/SIMULINK와 PLECS를 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 에너지 패러다임의 전환이 가속화됨에 따라 기존 화석연료 기반의 발전원들은 다수의 재생에너지원으로 대체되고 있다. 이러한 재생에너지원들은 전력전자 기반의 컨버터를 통해 계통과 연계되므로 빠른 응답성을 가진다는 장점이 있다. 그러나, 이러한 재생에너지 연계 컨버터는 대개 최대 출력 영역에서 운전되며, 추가적인 에너지원이 없을 경우 기존의 동기발전기와 같이 계통관성을 지원할 수 없다. 이에 따라 계통의 안전성을 개선하기 위해 다양한 제어 방법들이 연구되고 있는 추세이다.

한편, 재생에너지원들은 크게 그리드팔로잉 인버터 (grid-following inverter, GFLI) 혹은 GFMI를 통해 전력계통과 연계된다. 여기서 GFLI는 위상동기회로 (phase-locked loop, PLL)를 통해 계통전압과 동기화되어 계통을 지원한다. 그러나, 약계통 연계에서의 GFLI는 PLL로 인한 불안정성으로 인하여 발산하게 되어 계통을 지원할 수 없게 된다 [1]. 반면, GFMI는 출력전력에 따라 동기화를 이루는 동기발전기의 특성을 모사하도록 운전되므로 약계통에 안정적으로 연계될 수 있다. 하지만, 약계통과 연계되면 큰 계통 임피던스 및 이로 인한 큰 전압강하로 인해 출력전압 및 출력전력이 제한되게 된다.

본 논문은 계통강건도를 통해 도출된 계통 임피던스를 인버터의 출력전류 및 전압 제약에 반영하여 GFMI의 출력전력 제한 영역을 도출한다. 또한, GFMI가 최대 출력전력을 공급하기 위해 출력제한을 추종하는 PQ 지령 제어 방법을 제안한다. 이를 검증하기 위해 MATLAB/SIMULINK 및 PLECS를 기반으로 synchronous power controller (SPC)로 운전되는 GFMI를 모의시험하여 출력전력 제한 영역의 유효성을 검증한다.

2. 그리드포밍 인버터의 출력제한 분석 및 제어

2.1 SCR의 정의

인버터 기반 발전원 (inverter-based resource, IBR)은 그림 1과 같이 독립 운전 모드로 동작하거나 utility grid와 연계되어 부의 부하 (negative load)로 동작한다.

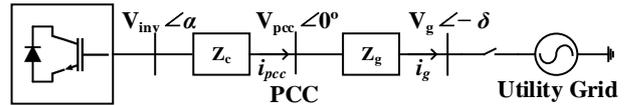


그림 1. 인버터 기반 발전원의 등가회로 (switch on: 계통 연계, switch off: 독립 운전)

여기서 계통연계로 동작하는 IBR은 계통 임피던스로 인해 출력전력이 제한될 수 있다. 예를 들어, 계통 임피던스가 매우 크면 정격운전 시 전압강하가 커져 point of common coupling (PCC) 전압이 높아져야 한다. 그러나, PCC 전압, 곧 인버터의 출력전압은 직류단 전압 및 PWM 방식에 의해 제한되므로 출력전력 또한 제한된다. 이와 같이 큰 계통 임피던스를 가지는 계통, 즉 약계통과 연계되는 IBR은 SCR을 통해 표현될 수 있다. SCR의 정의는 식 (1)과 같으며, 일반적으로 SCR이 3 미만이면 약계통으로 여겨진다 [2].

$$SCR = \frac{S_{SC}}{P_{Rated}} \approx \frac{1}{Z_{g,pu}} \quad (1)$$

여기서 S_{SC} 는 PCC에서 발생한 단락고장으로 인해 계통으로부터 유입되는 단락용량이고, P_{Rated} 는 인버터가 PCC에 공급할 수 있는 정격유효전력이다. 한편, P_{Rated} 는 인버터 용량에 의해 고정되므로 SCR은 계통의 전압과 임피던스에 의해 결정된다 ($S_{SC}=V_g^2/Z_g$). 여기서 계통전압은 계통 규정 (grid code; 통상적으로 정격전압의 $\pm 5\%$)을 만족해야 하므로, 계통전압을 1 [p.u.]로 가정할 수 있다. 따라서, SCR은 계통 임피던스로 인해 결정된다. 또한, 계통선로는 계통의 저항과 리액턴스는 X/R 비에 의해 결정된다.

2.2 그리드포밍 인버터의 출력제한 및 출력 제어 방법

GFMI는 PCC에서 측정된 전압과 전류를 기반으로 PQ를 제어한다. 약계통의 경우 그림 1의 필터 임피던스 Z_c 가 계통

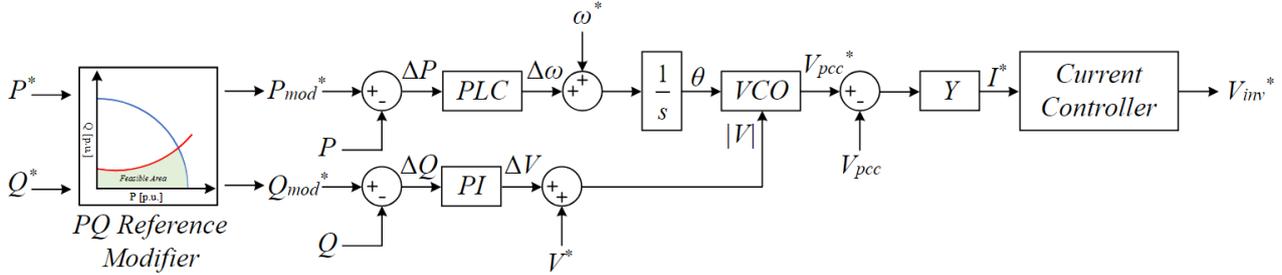


그림 3. PQ 지령 수정기를 반영한 Synchronous Power Controller

임피던스 Z_g 에 비해 매우 작은 값을 가지므로, PCC의 전압은 곧 인버터 출력전압과 같다고 가정할 수 있다. 따라서, PCC 전압은 인버터의 직류단 전압 및 PWM 방식에 의해 제한되며, PCC 전류 또한 인버터의 정격전류에 의해 제한된다. 이러한 제한 조건은 식 (2)-(3)과 같다. 여기서 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 는 공간 벡터 전압 변조 (space vector PWM, SVPWM)이 최대 변조 전압을 의미하며, 0.9는 제어 마진을 고려한 인버터의 전압 제한을 뜻한다.

$$|i_{pcc}| \leq I_{rated} \quad (2)$$

$$|v_{pcc}| \approx |v_{inv}| \leq V_{max} = \frac{0.9V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

한편, PCC 전압과 계통전압과의 차를 기반으로 PCC 전류를 도출하며 이를 바탕으로 GFMI의 출력 PQ를 나타내면 식 (4)-(5)와 같다.

$$P_{pcc} = \frac{3(R_g V_{pcc}^2 - R_g V_{pcc} V_g \cos \delta + X_g V_{pcc} V_g \sin \delta)}{2Z_g^2} \quad (4)$$

$$Q_{pcc} = \frac{3(X_g V_{pcc}^2 - X_g V_{pcc} V_g \cos \delta - R_g V_{pcc} V_g \sin \delta)}{2Z_g^2} \quad (5)$$

여기서 출력 PQ는 우선 식 (2)의 인버터 전류 제한에 따라 제한된다. 인버터 전류제한에 따른 출력 PQ의 제한을 나타내면 식 (6)과 같다.

$$(P_{pcc})^2 + (Q_{pcc})^2 \leq \left(\frac{3}{2} V_{max} I_{rated} \right)^2 \quad (6)$$

전압제한으로 인한 출력제한 또한 PQ를 토대로 도출할 수 있다. 먼저, 식 (4)-(5)의 코사인 및 사인항을 제곱해서 더해지면 PCC 전압에 대한 2차 방정식이 도출된다. 그 다음 근의 공식을 활용하여 전압제한을 고려하면 인버터의 출력전력 제한은 식 (7)과 같이 도출된다.

$$\left(P_{pcc} - \frac{3 V_{max}^2 R_g}{2 Z_g^2} \right)^2 + \left(Q_{pcc} - \frac{3 V_{max}^2 X_g}{2 Z_g^2} \right)^2 \geq \left(\frac{3 V_{max} V_g}{2 Z_g} \right)^2 \quad (7)$$

앞서 도출된 식 (6)과 (7)를 바탕으로 출력 가능 영역을 도식화하기 위해 GFMI의 파라미터를 표 1과 같이 설정하였다. 이에 출력 가능 영역은 그림 2의 초록색 영역과 같다.

한편, 분산전원 접속규정인 IEEE Std 1547-2018에 따르면, 약계통 연계에서의 GFMI는 (Category B) 그림 2의 검정색 영역을 만족해야 한다 [3]. 그러나, 해당 GFMI처럼 낮은 SCR을

표 1. GFMI 파라미터

DC-Link 전압	700 [V]
계통전압	380 [V_{rms}]
인버터 용량	100 [kVA]
SCR	1.25
X/R 비	10/1

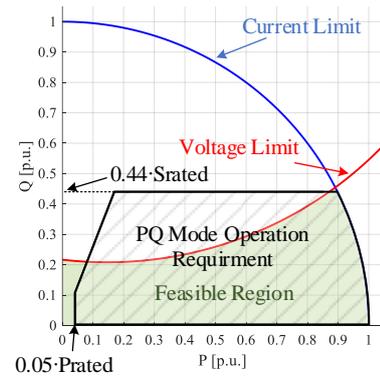


그림 2. SCR=1.25, X/R ratio=10에서의 GFMI의 출력가능영역 (초록색 영역) 및 분산전원 접속 규정에 따른 PQ 운전모드 동작 요구영역 (검정색 영역)

갖는 분산전원은 출력전력 요구사항을 만족하지 못하므로, 식 (6)과 (7)의 제한 하에서 출력전력을 최대로 활용할 수 있는 제어 전략이 수립되어야 한다. 즉, 출력전력의 지령이 출력 가능 영역으로 전환되어야 하므로, 그림 3과 같이 PQ 지령 제어기를 구성할 수 있다.

제한하는 PQ 지령 제어기의 동작은 다음과 같다. 출력전력 지령이 출력 가능 영역에 위치하면 출력전력 지령은 그대로 유지된다. 반면, 출력전력 지령이 출력 가능 영역 밖에 위치하면 지령이 출력 가능 영역으로 수정된다. 이 때, 유효전력 지령을 우선적으로 출력하며, 무효전력 지령은 제한영역에 맞추어 수정된다. 여기서 power loop controller (PLC)는 스윙방정식을 기반으로 동기기의 관성과 댐핑을 모사하며 동기각을 결정한다. PI 제어를 기반으로 하는 무효전력 제어는 인버터의 출력전압의 크기를 결정한다. Voltage controlled oscillator (VCO)는 보정된 위상과 전압 크기를 합성하여 출력전압을 형성한다. 이러한 출력전압은 동기기의 고정자 임피던스를 모사한 가상 어드미턴스를 통해 출력전류 지령으로 도출된다. 최종적으로 전류제어기를 통해 인버터의 출력전압이 형성되어 수정된 PQ만큼 PCC로 공급된다.

3. 시뮬레이션 검증

앞서 분석한 SCR에 따른 GFMI의 출력 가능 영역 및 이를 고려한 PQ 지령 수정기를 검증하기 위해 MATLAB/SIMULINK 및 PLECS 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에

사용된 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

본 시뮬레이션에서는 무효전력 지령을 0.44 [p.u.]로 고정한 후, 4초 마다 유효전력 지령을 0.9 [p.u.]에서 0.2 [p.u.]까지 0.1 [p.u.] 간격으로 변경하였다. 그림 2에 따르면, P가 0.9 [p.u.]에서는 최대 무효전력을 공급할 수 있으나, P가 이보다 작아지는 영역에서는 공급할 수 없다. 이에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다. 출력제한 영역 밖의 무효 전력지령이 인가될 경우, 출력 무효전력은 지령을 추종하지 못하며, MI는 과변조 영역에 존재하며 심할 경우 발산하게 된다. 따라서, 이를 통해 GFMI 출력제한의 유효성을 입증하였다.

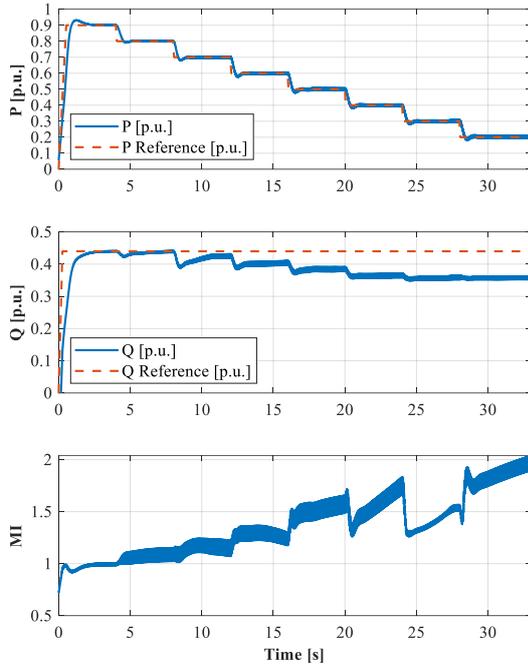


그림 4. 출력 가능 영역 밖에서의 GFMI의 출력전력 및 MI

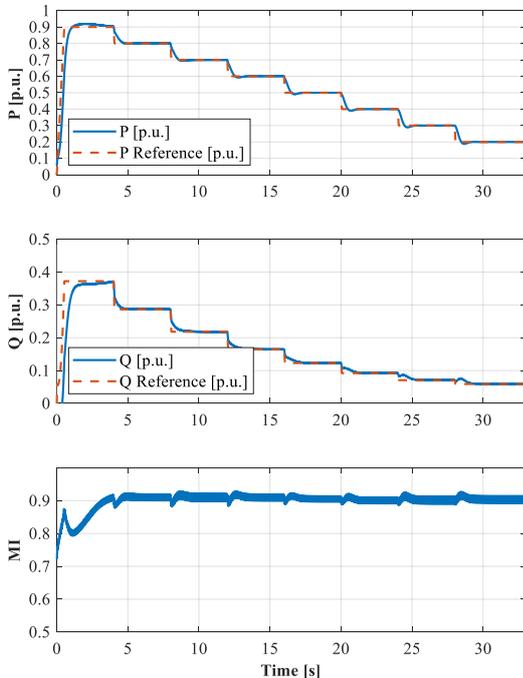


그림 5. PQ 지령수정기 적용에 따른 GFMI의 출력전력 및 MI

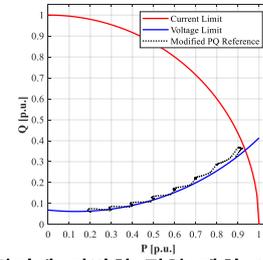


그림 6. 지령수정기에 기반한 전압 제한 영역 내 PQ 운전점 변화

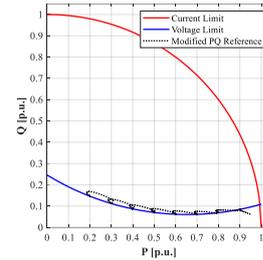


그림 7. SCR=1.25, X/R ratio=2에서의 PQ 운전점 변화

이에 반해 동일조건에서 PQ 지령 수정기를 반영한 결과는 그림 5, 6과 같다. 무효전력 출력지령은 전압 제한 경계를 따라 조절되었으며, 이로 인해 MI는 0.9로 유지되었다.

한편, X/R 비가 매우 낮은 상황, 즉 배전계통 연계에서의 PQ 지령 수정기의 성능을 평가하기 위해 X/R 비를 2로 설정하였다. 이에 대한 결과는 그림 7과 같으며, 마찬가지로 전압 제한 경계를 따라 무효전력이 조절되는 것을 확인하였다.

4. 결론

동기발전기의 특성이 반영된 GFMI는 약계통의 불안정한 전압을 보상할 수 있지만, SCR에 의해 출력전력 제한영역이 상이해지므로 적절한 출력전력으로 전환할 수 있는 제어 방법이 요구된다. 이에 본 논문은 출력 가능 영역을 도출하여 출력전력을 최대로 공급할 수 있는 PQ 지령 수정기를 제안하였으며, 유효성 검증을 위해 MATLAB/SIMULINK와 PLECS를 사용하여 검증하였다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00321745, 에너지 국가종합실증단지 인프라를 활용한 V2G 서비스 및 계통 안정화 기술 검증). 또한, (주) 미립씨스콘에서 PLECS 사용을 제공함에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] L. Dewangan and H. J. Bahirat, "Controller Interaction and Stability Margins in Mixed SCR MMC-Based HVDC Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 2835-2846, Jul. 2020
- [2] F. Zhang, H. Xin, D. Wu, Z. Wang and D. Gan, "Assessing Strength of Multi-Infeed LCC-HVDC Systems Using Generalized Short-Circuit Ratio," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 467-480, Jan. 2019
- [3] IEEE Std 1547-2018, "IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," Apr. 2018.