

태양광 발전 시스템을 위한 그리드포밍 컨버터 제어

김혜진, 박재영, 백종복
한국에너지기술연구원

Grid-forming control for solar PV systems

Hyejin Kim, Jaeyoung Park, Jongbok Baek
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

태양광, 풍력 발전 및 배터리 에너지 저장 시스템 등 인버터 기반의 분산 자원으로 구성된 전력 시스템은 기존 전력 시스템에 비해 낮은 관성 특성을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 동기 발전기의 특성과 기능을 모사하는 그리드포밍 컨버터가 제안되었으나 기존 그리드포밍 제어 기술은 주로 배터리와 같은 강건한 에너지를 기반으로 개발되었다. 본 논문에서는 태양광 발전과 같은 간헐적 자원 기반의 그리드포밍 제어 기술을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

태양광 및 풍력 발전 등 재생 에너지 자원의 전력망 접속이 증가함에 따라 전력 시스템의 안정성과 신뢰성 저하 문제가 대두되고 있다. 기존의 전력 시스템은 대규모 동기 발전기가 제공하는 관성(Inertia)을 통해 과도 안정성을 유지한다. 그러나 전력전자 컨버터 기반의 분산 자원의 증가하면서 시스템 관성이 감소하여 전력망이 불안정해질 수 있다.

그리드포밍 인버터(GFMI, Grid-forming Inverter)는 이러한 문제를 해결하기 위한 기술로 기존 동기 발전기의 특성과 기능을 모사한다.^[1] 기존의 그리드추종형 인버터(Grid-following Inverter)는 PLL(Phase-locked loop)을 통해 계통과 동기화를 하는 반면, GFMI는 스스로 계통 전압과 주파수를 형성하는 전압원으로 동작한다. 이러한 본질적인 능력은 GFMI가 전통적인 동기 발전기 없이도 전력계통에 관성과 댐핑을 제공함으로써 전력 계통을 안정화시킨다. 그러나 기존 GFMI는 주로 안정적인 전력을 출력할 수 있는 배터리와 같은 강건한 에너지를 중심으로 개발되었다. 또한, GFMI는 전력반도체 소자로 이루어져 있으므로 고정 관성과 댐핑을 적용할 경우 시스템의 운전점(Operating point)에 따라 정격을 초과하거나 제어기 포화 문제가 발생할 수 있다. 따라서 태양광 발전과 같은 간헐적 자원에 대응이 가능하며 과도 상태에 효과적으로 대응 가능한 GFMI 기술이 필요하다.^[2]

본 논문에서는 전력 예비력 조절이 가능한 태양광(PV) 발전 시스템을 위한 그리드포밍 제어 방법을 제안하였다. 제안 방법은 최대 전력점(MPP, Maximum power point) 및

전력 예비력 제어기의 출력을 전력지령으로 사용하여 합성 관성을 제어한다. 또한, 인버터의 과도 안정성을 향상시키고 제어기 포화를 방지하기 위해 유효전력을 기반으로 한 적응형 관성 및 댐핑 조정 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 태양광 발전 시스템의 그리드포밍 제어

2.1 전력 예비력 기반 PV 그리드포밍 제어 알고리즘

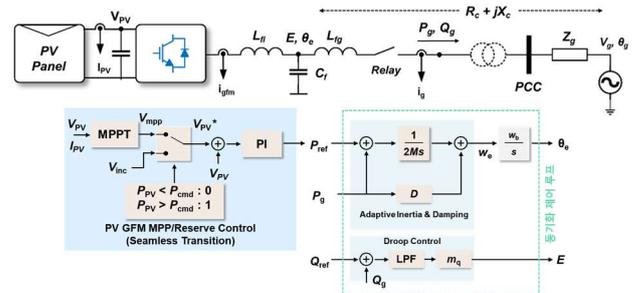


그림1 PV GFMI의 구조 및 제어 방법
Fig.1 Schematic of PV GFMI inverter and control method

그림 1은 PV GFMI의 구조와 제어 블록을 나타낸다. GFMI는 LC 또는 LCL 필터를 통해 계통에 연결되며 독립 또는 계통 접속 모드에 따라 릴레이가 온-오프 된다. PV 패널 전압(V_{pv})과 전류(I_{pv})는 MPPT(Maximum power point tracking) 알고리즘을 통해 V_{mpp} 를 생성하고, 식 (1)의 전력 예비력 제어 조건에 따라 PV 전압 지령 V_{pv}^* 을 생성한다.

$$V_{pv}^* = \begin{cases} V_{mpp} & (P_{pv} < P_{cmd}) \\ V_{inc} & (P_{pv} > P_{cmd}) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 P_{cmd} 는 외부 전력 지령으로 PV 가용 전력(available power)을 기반으로 결정되는 값으로 가용 전력을 크게 설정할 경우 큰 관성 예비력을 확보할 수 있다. V_{pv}^* 는 비례-적분 제어기를 통해 동기화 제어 루프의 전력 지령을 생성한다. 동기화 제어 루프는 IP(Integral-proportional) 제어기를 통해 유효 전력 제어를 함으로써 위상각 θ_e 을 생성하고, 무효전력(Q)-전압(V) 드롭을 통해 전압 크기 지령 E 를 생성한다. 여기서, M 은 관성 계수, D 는 댐핑 계수, ω_b 는 기준 주파수(rad/s), m_q 는 Q-V 드롭 계수를 나타낸다. 생성된 GFMI의 출력 전압 지령은 내부 전압 및 전류 루프를 통해 제어된다.

2.2 적응형 관성 및 댐핑 제어

GFMI는 계통 연계 지점의 전압과 주파수 변동에 따라 유효전력과 무효 전력을 공급하며, GFMI가 공급하는 유효전력의 크기는 식 (2)와 같고, 유효전력과 관성 및 댐핑 계수와와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$P_g \approx \frac{E \cdot V_g}{X_c} (\theta_e - \theta_g) \quad (2)$$

$$2M\omega_e = (P_{ref} - P) + 2MD \frac{E V_g}{X_c} (\omega_g - \omega_e) \omega_b \quad (3)$$

위 식에서 볼 수 있듯이 GFMI의 유효전력 출력은 GFMI와 계통 위상각의 차이에 의해 결정된다. 또한 계통 주파수 변화에 따른 GFMI의 출력전력 변동은 관성 및 댐핑 계수에 의해 정해지므로 GFMI의 초기 운전점이 정격에 가까울 때 계통 주파수의 변동이 크게 발생할 경우 GFMI의 과출력에 따른 제어기 포화 또는 고장이 발생할 수 있다. 따라서 관성과 댐핑 계수를 실시간으로 조정함으로써 GFMI의 과도 상태에 효과적으로 대응할 필요가 있으며, 유효전력에 따른 적응형 관성 및 댐핑 제어 방법을 식 (4) - (5)에 나타내었다.

$$M' = M_0 - k_M \cdot P_g \quad (M_{min} < M' < M_{max}) \quad (4)$$

$$D' = D_0 + k_D \cdot P_g \quad (D_{min} < D' < D_{max}) \quad (5)$$

GFMI의 유효전력 출력이 낮은 영역에서는 관성 계수의 영향을 크게 함으로써 주파수 급변 순간 관성에 의한 유효전력 응답 특성 저하를 막고 GFMI의 계통 관성 기여도를 증가시킨다. 또한, 유효전력 출력이 높은 영역에서는 댐핑 계수의 영향을 크게 함으로써 GFMI의 출력 전력을 제한하여 인버터의 포화 또는 고장을 방지한다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 PV GFMI의 성능을 Matlab/Simulink를 통한 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 그림 2는 GFMI의 MPPT 운전 시 계통 주파수의 RoCoF(Rate of Change of Frequency)가 $\pm 1\text{Hz/s}$ 일 때의 유효전력 출력과 PV DC 전압을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 PV GFMI는 계통 주파수의 증가 및 감소 구간에서 유효 전력을 계통으로 흡수 및 방출하며 MPP 운전을 지속할 수 있다. 그림 3은 계통 주파수가 -2Hz/s 로 변했을 때 관성 및 댐핑 계수에 따른 유효전력 출력 응답을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 인버터의 유효전력 크기에 따른 관성 및 댐핑 계수를 조정하여 유효전력이 정격을 넘거나 제어기가 포화되는 것을 막고 PV 전압을 안정화할 수 있다. 또한 PV 가용 전력이 충분하거나 주파수 급변 시에는 댐핑 영향을 줄임으로써 GFMI의 출력을 증가시켜 계통 주파수 안정화에 기여할 수 있다.

표 1 PV GFMI 시뮬레이션 파라미터

Table 1 System parameters for PV GFMI

Parameter	Value	Parameter	Value
Rated Power, P_0	5 kW	M_0	1
Grid Voltage, V_g	380 Vrms	D_0	0.01
Grid Frequency, f_g	60 Hz	PV MPP voltage	651 V

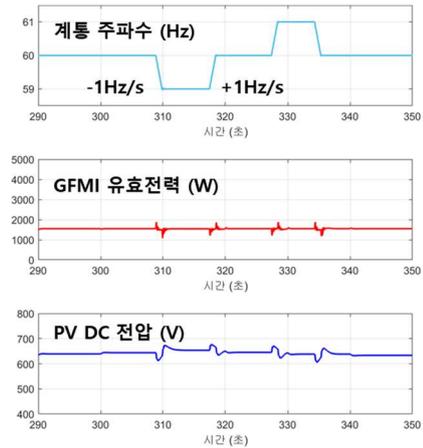


그림2 계통 주파수 변화에 따른 GFMI의 유효전력 및 PV DC 전압

Fig.2 Active power and PV DC voltage of GFMI according to $\pm 1\text{Hz/s}$ RoCoF

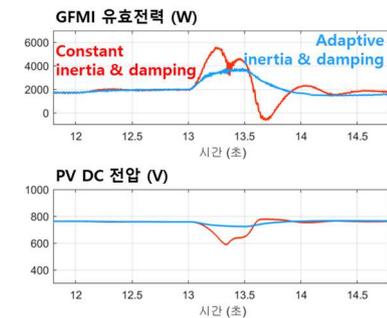


그림3 -2Hz/s RoCoF 발생 시 GFMI 유효전력 출력 비교

Fig.3 Active power of GFMI according to -2Hz/s RoCoF for constant and adaptive inertia and damping coefficient

4. 결론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 위한 그리드포밍 컨버터 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 PV GFMI 제어 방식은 MPPT 제어기의 출력을 동기화 제어 루프의 지령으로 하여 관성 예비력 확보가 가능하다. 또한, 주파수 변동 시 댐핑을 저감시켜 계통 주파수 안정화에 기여하고 인버터 출력전력을 정격 이하로 제어함으로써 인버터의 과출력 및 포화를 방지할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 효과와 성능을 검증하였다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업(C4-2456)을 재원으로 수행한 연구개발과제의 결과입니다.

참고 문헌

- [1] D. B. Rathnayake et al., "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," in IEEE Access, vol. 9, pp. 114781-114807, 2021.
- [2] B. Pawar, E. I. Batzelis, S. Chakrabarti and B. C. Pal, "Grid-Forming Control for Solar PV Systems with Power Reserves," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 12, no. 4, pp. 1947-1959, Oct. 2021.