

불평형 계통에서의 유효전력 리플 저감을 위한 그리드 포밍 컨버터 내부 제어기 설계

서용교, 이정현, 김학수, 노의철
부경대학교

Internal Controller Design of Grid-Forming Converters for Active Power Ripple Reduction in Unbalanced Power Systems

Yong-Kyo Seo, Jung-Hyun Lee, Hak-Soo Kim, Eui-Cheol Nho
Pukyong National University

ABSTRACT

본 논문은 계통의 관성 유지, 약계통에서의 안정적인 동작, 독립 운전 등의 다양한 기능을 수행할 수 있는 그리드 포밍(Grid-Forming, GFM) 컨버터 시스템에서 계통 임피던스가 변하는 경우를 다루었다. 불평형 계통에서 발생하는 유효전력 리플을 저감하기 위한 그리드 포밍 컨버터의 내부 제어기를 설계하여 그 특성을 분석하였다.

1. 서론

전 세계적으로 신재생 에너지원의 발전 비중은 2010년 이후 꾸준히 증가세를 보이고 있다. 국내에서도 2030년까지 재생 에너지 비중 21.6% 달성을 목표로 하고 있으며, 이에 따라 전력전자 기반 발전원(inverter based resource, IBR)의 계통 접속이 늘어나고 있다. 이로 인해 동기 발전기 비중이 줄어들고 있으며 계통의 안정성과 계통 관성 저하에 대한 우려가 커지고 있다. 그리드 포밍 컨버터는 약계통에서 안정적으로 동작하고, 계통의 관성 유지 등의 기능을 수행할 수 있어, 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 기존 연구의 분석들은 대체로 계통 임피던스가 변화하지 않는 상황에만 초점이 맞춰져 있어 현실적인 고장 및 비정상 상황을 충분히 반영하지 못한다. 본 논문에서는 불평형 계통에서 발생하는 전력 성분을 분석하고, 이를 통해 유효전력 리플을 저감하기 위한 그리드 포밍 컨버터의 내부 제어기를 설계한다. 또한 다른 제어기법들과의 출력 특성을 비교 및 분석하여 성능을 평가하고자 한다.

2. 유효전력 리플 저감을 위한 내부제어기 설계

2.1 그리드 포밍 컨버터의 제어

그림 1은 그리드 포밍 컨버터의 계통 연계 모델을 나타낸다. 먼저 외부 제어 루프에서 유효전력과 무효전력의 지령 값과 측정된 값을 바탕으로 출력 주파수와 전압 지령을 생성한다. 그리드 포밍 컨버터의 외부 제어기법으로는 가상 동기 발전기(virtual synchronous generator, VSG) 기법과 이를 기반으로 한 PI 구조, IP 구조의 제어기법 등을 적용할 수 있다. 생성된 전압 지령은 내부 전압 제어단으로 입력되어 전류 지령을 출력한다. 내부 전압 제어에서는 cascaded PI 제어나 가상 임피던스, 가상 어드미턴스 기법 등이 적용될 수 있다. 특히 내부 제어 기법으로 가상 어드미턴스를 적용하면 컨버터 출력단에 실제 임피던스가 존재하는 것처럼 동작시킬 수 있다. 이 경우 계통 연계 모델은 가상 리액턴스 L_v 와 계통 임피던스 L_g 를 통해 직렬 연결된 등가회로로 표현할 수 있다.

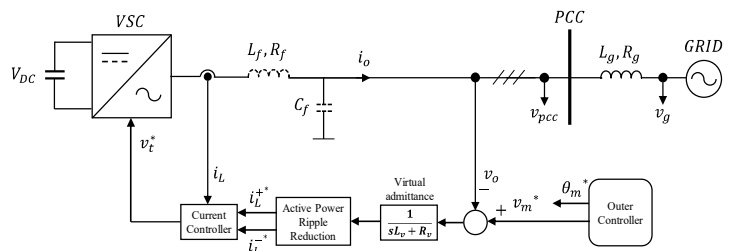


그림 1 그리드 포밍 컨버터의 계통 연계 모델
Fig 1. Grid-connected model of grid-forming converter

이후 전류 지령은 내부 전류 제어기를 거쳐, 실제 출력 전류와의 차이를 보정하여 컨버터 출력 전압 지령을 생성한다.

2.2 유효전력 리플 저감 기법

불평형 계통에서는 식 (1)과 같이 유효전력과 무효전력을 DC 성분과 제2 고조파 성분인 코사인 항, 사인 항으로 나눌 수 있다. 또한 각 성분을 식 (2)와 같이 정상분과 역상분의 전압, 전류 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} P = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \\ p_{s2} \\ p_{c2} \\ q_{c2} \\ q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_d^+ & v_q^+ & v_d^- & v_q^- \\ v_q^+ & -v_d^+ & v_q^- & -v_d^- \\ v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & v_d^+ \\ v_d^- & v_q^- & v_d^+ & v_q^+ \\ v_q^- & -v_d^- & v_q^+ & -v_d^+ \\ -v_d^- & -v_q^- & v_d^+ & v_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

유효전력 리플을 저감시키기 위해서는 p_{s2} , p_{c2} 항이 0이 되도록 하는 정상분과 역상분 전류 지령을 생성하여 이를 각각 제어해야 한다. 다만 이러한 역상분 제어에는 추가적인 PI 제어기와 시퀀스 추출을 위한 정확한 위상값이 필요하다.^[1]

2.3 불평형 모의 시뮬레이션

IEEE 표준에 따르면, 계통의 강도를 단락비(short circuit ratio, SCR) 값에 따라 구분할 수 있다. 본 논문에서는 계통의 리액턴스를 단락비 3.33에 해당하는 0.3 p.u.에서 단락비 2에 해당하는 0.5 p.u.로 변화시키며 불평형 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 계통 연계 시스템과 제어 파라미터를 나타낸다.

표 1 계통 연계 시스템 및 제어 파라미터

Table 1 Grid-connected system and control parameters

S_b	5 [kVA]	L_v	0.5 [p.u.]
v_g	220 [V]	ω_{LPF}	34.95 [rad/s]
f_b	60 [Hz]	관성 계수 H	5 [s]
f_{sw}	5 [kHz]	K_P	0.028

그림 2에서는 각각 IP 구조, IP 구조에 진항 경로의 지역 통과 필터 추가^[2], 유효전력 리플 저감 기법을 추가한 모델의 주파수 변화를 비교한다. t=4초에서 3상 평형 계통 임피던스 변동 시, IP 구조의 경우 주파수가 가파르게 379.5 rad/s까지 증가하였다가 정상상태로 돌아온다. 2상, 1상 불평형 계통 임피던스 변동 시에는 379 rad/s까지 증가할 뿐만 아니라 1 rad/s 크기의 계통 주파수 2배 오실레이션이 발생한다. 이는 IP 구조의 특성상 유효전력 리플이 출력 주파수에 영향을 끼치기 때문이다. LPF와 유효전력 리플 저감 기법을 추가한 모델에서는 이런 주파수 리플이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 4는 각 모델에서의 유효전력 및 무효전력 변화를 보여준다. 3상 평형 계통 임피던스 변동 시에는 유효전력과 무효전력 모두 과도응답에서 약간의 차이를 보일 뿐 큰 변화는 없다. 2상 및 1상 불평형 변동 시에는 IP 구조와 LPF 추가 모델에서 계통 주파수 2배의 전력 리플이 발생한다. 그러나 유효전력 리플 저감 기법을 적용한 모델에서는 유효전력 오실레이션이 약 89.5% 감소하는 효과를 보였으며, 반면에 무효전력 오실레이션은 약 27.6% 증가하는 결과를 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 불평형 계통에서의 유효전력 리플을 저감하기 위한 그리드 포밍 컨버터의 내부 제어를 설계하고, 그 성능을 분석하였다. 유효전력 리플 저감 기법을 적용한 모델은 유효전력뿐만 아니라 주파수 리플도 크게 감소시켜, 불평형 상황에서도 안정적인 동작과 높은 전력 품질을 유지할 수 있음을 확인하였다.

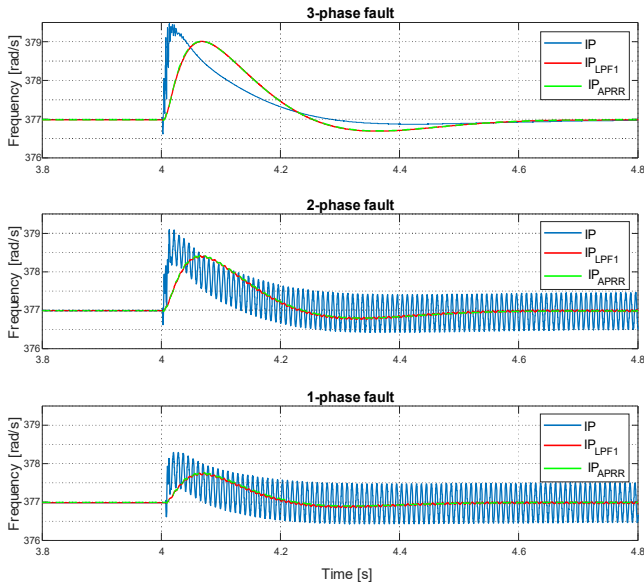


그림 2 계통 임피던스 변화 시의 주파수 변화

Fig 2. Frequency variation in case of grid impedance variation

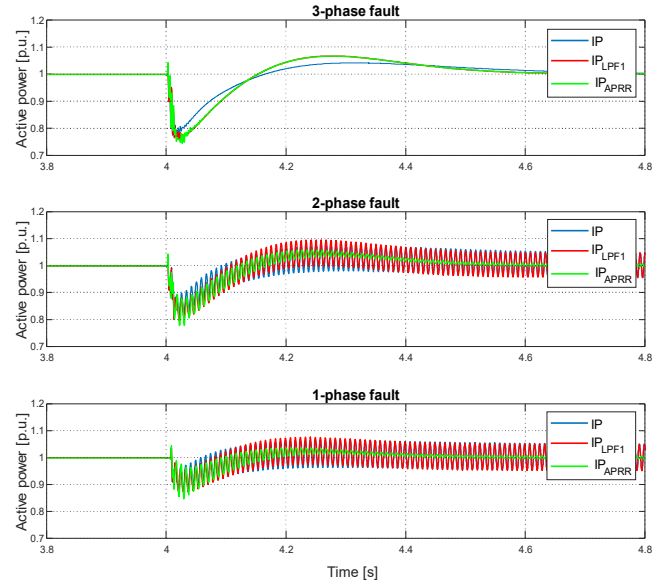


그림 3 계통 임피던스 변화 시의 유효전력 변화

Fig 3. Active power variation in case of grid impedance variation

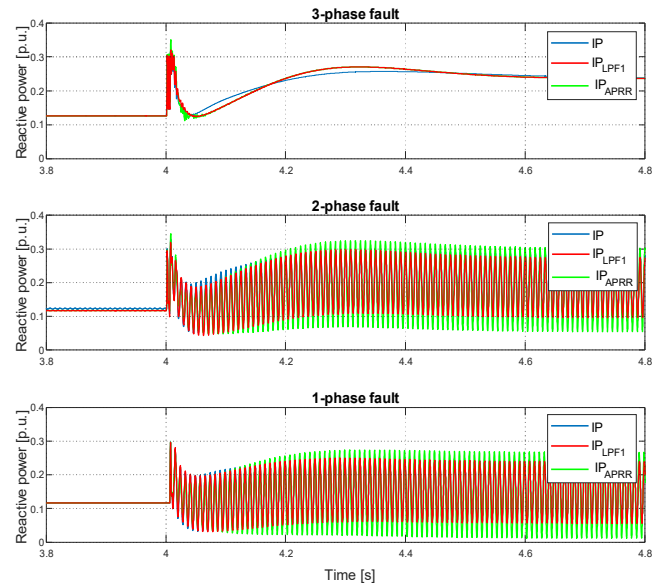


그림 4 계통 임피던스 변화 시의 무효전력 변화

Fig 4. Reactive power variation in case of grid impedance variation

이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (P0012451, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] R. Aljarrah, B. B. Fawaz, Q. Salem, M. Karimi, H. Marzoghi and R. Azizpanah-Abarghoee, "Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review," in IEEE Access, vol. 12, pp. 5534-5561, 2024
- [2] C. H. Bae, H. S. Kim and E. C. Nho, "Analysis of Control Characteristics According to the Position of Lead-Lag Compensator for Grid Forming Converter Based on Virtual Synchronous Generator" Power Electronics Conference, pp. 506-507, 2023, July.