

# 소신호 안정도 분석을 통한 그리드 포밍 컨버터의 유효 전력 제어기 설계 방법

이지유, 맹준열, 쇠성휘  
서울대학교

## Active Power Controller Design Method of Grid-Forming Converter Based on Small-Signal Stability Analysis

Jiyu Lee, Junyeol Maeng, Shenghui Cui  
Seoul National University

### ABSTRACT

최근 계통에 연계되는 전력전자 기반 발전원이 증가함에 따라, 약계통에서도 운전이 가능한 그리드 포밍 컨버터가 주목받고 있다. 이러한 컨버터의 안정적인 계통 연계를 위해서는 적절한 제어기 파라미터를 선정하는 것이 필요하다. 이에 본 논문에서는 소신호 안정도 분석을 통한 그리드 포밍 컨버터의 제어기 설계 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Control Hardware-in-the-Loop 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

최근 신재생 에너지원의 기술 발전에 따라 계통에 연계되는 전력전자 기반 발전원이 증가하며 기존의 동기 발전기를 대체하고 있다. 이러한 추세는 기존의 동기 발전원의 회전 관성으로 유지되던 계통의 강도를 감소시키고 있으며, 이에 Phase-Locked Loop(PLL)를 사용하는 Grid-Following(GFL) 컨버터의 제어 안정성이 떨어지고 있다.<sup>[1]</sup> 반면에 Grid-Forming(GFM) 컨버터는 컨버터를 전압원으로 제어하며 동기 발전기의 외부 특성을 모의하므로 PLL 없이 계통에 동기화가 가능하다. 이에 따라 Short Circuit Ratio(SCR)이 낮은 약계통에서도 안정적인 운전이 가능하므로 주목받고 있다.

GFM 컨버터의 안정적인 계통 연계를 위해서는 적절한 제어기 파라미터 선정이 중요하다. 특히 컨버터 출력 전력을 안정적으로 제어하기 위해서는 제어기와 출력 전력 간의 비선형성을 고려한 모델링이 필요하다. 이에 따라 본 논문에서는 소신호 모델링을 통해 유효 전력 제어 시스템의 안정도를 분석하고, 적절한 제어기 파라미터를 선정하는 방법론을 제안한다. 그리고 이를 적용하여 GFM 컨버터의 유효 전력 제어에 주로 사용되는 Droop 방법과 가상 관성 모의 방법의 안정도를 분석하였다. 분석 과정에서 제어기 파라미터의 변화에 따른 안정도 변화 경향성을 파악하였고, 제안한 방법은 Control Hardware-in-the-Loop 시뮬레이션(C-HiLs)를 통해 검증하였다.

### 2. 그리드 포밍 컨버터의 유효 전력 제어기 설계

#### 2.1 그리드 포밍 컨버터의 유효 전력 제어 기법

계통과 연계된 그리드 포밍 컨버터는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

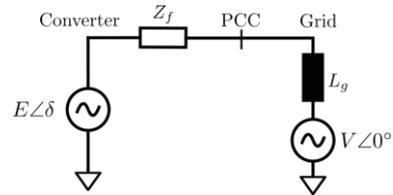


그림 1. 그리드 포밍 컨버터의 계통 연계 시스템 등가회로

이때  $Z_f = R_f + jX_f$  는 필터 임피던스이다. 컨버터 출력 전압  $E$  와 계통 전압  $V$  의 위상차를  $\delta$  로 정의하면 컨버터에서 출력되는 유효 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{EV(R_f \cos\delta + X_f \sin\delta) - R_f V^2}{R_f^2 + X_f^2} \quad (1)$$

이때  $X = X_f + X_g$  이고,  $X_g$  는 계통 인덕턴스  $L_g$  에 의한 임피던스이다. 위 수식을 바탕으로 유효 전력 제어기는  $E$  와  $V$  의 위상차를 제어하여 출력 유효 전력을 제어한다. 그리드 포밍 컨버터의 유효 전력 제어 블록도는 다음과 같다.

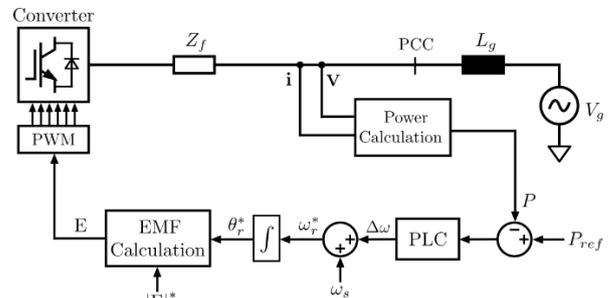


그림 2. 그리드 포밍 컨버터의 전력 제어기 블록도

그림 2에서 PLC 는 유효 전력 제어기의 전달함수이다. 이때 컨버터 출력 지령  $P_{ref}$  와 PCC단 출력 전력  $P$  의 오차가 컨버터와 계통의 동기화에 이용된다. 유효 전력 제어기의 영향을 정확히 분석하기 위해, 본 논문에서는 컨버터의 전압 크기를 제어하는 무효 전력 제어기와 inner loop의 전류 제어를 분석에 포함시키지 않았다.

#### 2.2 유효 전력 제어기의 소신호 모델링

컨버터의 유효 전력 출력값이 변화하면 가상 동기 발전기의 회전자 속도가 일시적으로 변하므로  $V$  와  $E$  의 위상차도 변화한다. 따라서 컨버터의 동작점을 기준으로 위상차 미소 변화량  $\Delta\delta$  와 유효 전력 출력의 미소 변화량  $\Delta P$  의 관계식을

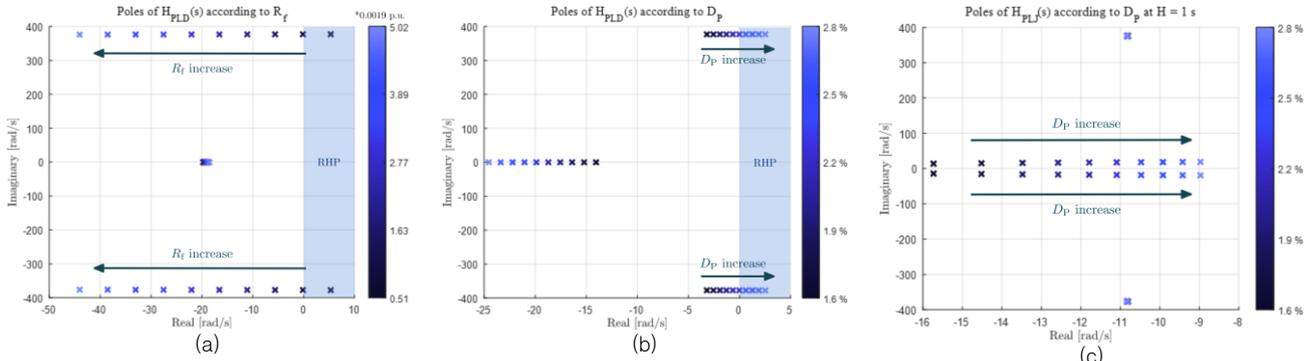


그림 3. 파라미터 변화에 따른 유효 전력 페루프 전달 함수의 극점 변화: (a)  $R_f$  변화 (b)  $D_p$  변화 (c)  $H = 1$  s 관성 모의 시  $D_p$  변화

구할 수 있다.  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$  으로 두고 수식을 정리하면 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$J_{P\delta}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta\delta} = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{(sL + R)^2 + (\omega_s L)^2} \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{L}{\omega_s} (E_0 V_0 \cos\delta_0 - V_0^2)$$

$$a_1 = \frac{R}{\omega_s} (E_0 V_0 \cos\delta_0 - V_0^2) \quad (3)$$

$$a_2 = \omega_s L E_0 V_0 \cos\delta_0 - R E_0 V_0 \sin\delta_0$$

$L$  은 필터 임피던스와 계통 임피던스를 모두 포함한 인덕턴스이고,  $R$  은 필터 저항  $R_f$  이다.  $E_0$ ,  $V_0$  는 각각 컨버터 전압과 계통 전압의 RMS 동작점이고,  $\omega_s$  는 계통의 각주파수이다. 수식 (2) 의 전달함수를 통해 유효전력 제어 시스템의 페루프 전달함수를 구할 수 있다. 이때 Power Loop Controller (PLC) 는 Droop 제어를 통해 구현하거나 가상 관성과 댐핑을 모의하여 구현할 수 있다. 만약 Droop 제어를 사용하는 경우 Power Loop (PL) 의 전달함수는 다음과 같다.

$$H_{PLD}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = \frac{\frac{D_p}{s} J_{P\delta}(s)}{1 + \frac{D_p}{s} J_{P\delta}(s)} \quad (4)$$

$D_p$  는 Droop 계수이다.

### 2.3 유효 전력 제어기의 소신호 안정도 분석 방법

페루프 시스템의 전달함수 극점이 모두 복소평면의 좌반면에 위치하는 경우 시스템이 안정하고, 한 개 이상의 극점이 우반면에 위치하는 경우 시스템이 불안정해질 수 있다. 따라서  $H_{PLD}(s)$  의 극점 분석을 통해 시스템의 소신호 안정도를 판별하고 적절한 제어기 파라미터를 설정할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 분석법을 이용하여 시스템 파라미터들이 제어 안정도에 미치는 영향을 살펴본다.

그림 3(a) 는 1 p.u. 출력 유효 전력, 1 p.u. 컨버터 출력 전압에서  $R_f$  변화에 따른  $H_{PLD}(s)$  의 극점 변화를 나타낸다.  $R_f$  가 증가할수록  $H_{PLD}(s)$  의 극점들이 점차 좌측으로 이동한다. 이를 통해 컨버터와 계통 사이의 저항 성분이 증가함에 따라 PL의 damping이 증가하고, 이것이 시스템의 안정도에 기여함을 알 수 있다. 또한 극점들의 허수부가  $377 \text{ rad/s} \approx 2\pi * 60 \text{ Hz}$  에 근접하는데, 이를 통해 출력 유효 전력 응답에서 60 Hz의 Synchronous Resonance (SR) 가 발생하고, 극점의 위치에 따른 SR 댐핑 효과가 달라짐을 예측할 수 있다.

그림 3(b) 는  $R_f = 0.037 \text{ p.u.}$  에서  $D_p$  를 2.15% 에서 3.26%로 변화시킬 때  $H_{PLD}(s)$  의 극점 변화를 나타낸다. 이때 컨버터 정격 전력만큼 유효 전력이 변화할 때, 계통 정격 주파수만큼 컨버터 전압원의 회전 주파수가 변하는 경우  $D_p = 100\%$  로 정의한다.  $D_p$  가 증가할수록  $H_{PLD}(s)$  의 극점들이 점차 우측으로 이동하며, 그림 3(a) 와 비교하였을 때 시스템에서 negative resistance가 증가하는 것과 같은 효과가 있다. 그림에서 극점이 우반면으로 넘어가는 경계값이  $D_p = 2.23\%$  이므로  $D_p < 2.23\%$  이면 소신호 안정성이 보장되고,  $D_p > 2.23\%$  이면 시스템은 불안정하다.

관성을 모의하여 PLC를 구현하는 경우 PL의 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$H_{PLJ}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = \frac{\frac{1}{\omega_s (Js + D)s} J_{P\delta}(s)}{1 + \frac{1}{\omega_s (Js + D)s} J_{P\delta}(s)} \quad (5)$$

$J$  는 가상 동기 발전기의 관성이고,  $D$  는 댐핑 계수이다. 이때 관성이  $J$  인 동기 발전기가 정격 속도로 운전될 때 가지는 회전 관성 에너지를 발전기의 정격 출력으로 나눈 값을 관성 시간 상수  $H$  로 정의한다. 그림 3(c) 는  $H = 1 \text{ s}$  에서  $D_p$  변화에 따른  $H_{PLJ}(s)$  의 극점 변화를 나타낸다. 이때  $D = \frac{1}{D_p \omega_s}$  이다. 그림 3(b) 와 비교하였을 때 같은  $D_p$  범위에 대해 극점들이 모두 좌반면에 위치하므로, 관성을 모의할 경우 더 넓은 범위의  $D_p$  에 대하여 소신호 안정성이 보장됨을 알 수 있다. 또한 극점에서  $377 \text{ rad/s}$  의 허수부가 존재하지는 않지만, 실수부가 매우 큰 음의 값이므로 SR에 대한 댐핑 효과가 매우 클 것을 알 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 소신호 안정도 분석법의 타당성 검증을 위해 C-HiLs 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 다음과 같다.

표 1 시뮬레이션 조건

Rated Power	3 kW
DC-link Voltage	400 V
Grid Voltage	220 V (line-line, rms)
Filter Inductance	0.0794 p.u.
Grid Inductance	0.0491 p.u.
Sampling Frequency	9 kHz

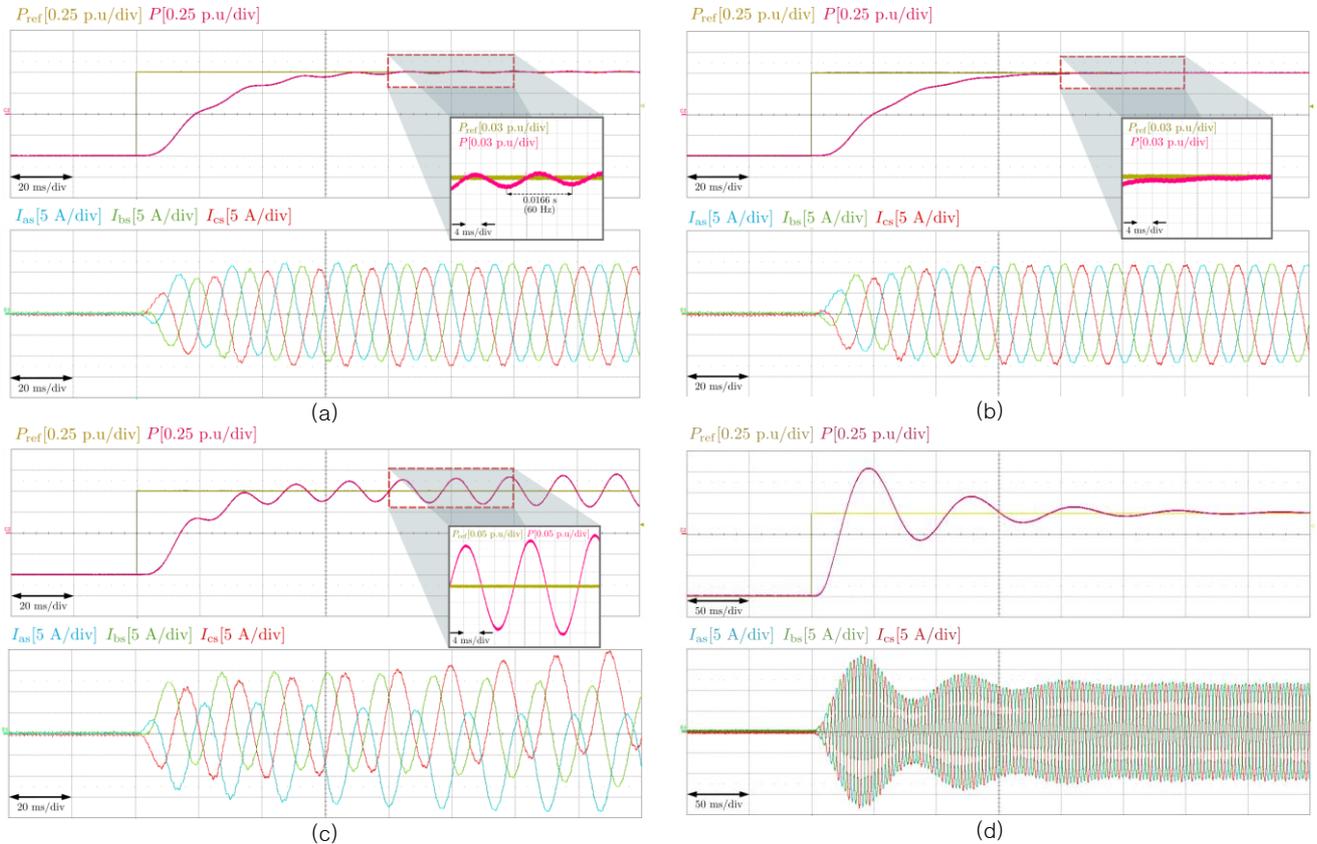


그림 4. 제어기 파라미터 선정에 따른 GFM 컨버터의 출력 응답 비교: 유효 전력 지령, 출력 유효 전력, PCC단 전류 (a)  $D_p = 2.15\%$ ,  $R_f = 0.0037$  p.u. (b)  $D_p = 2.15\%$ ,  $R_f = 0.0112$  p.u. (c)  $D_p = 3.26\%$ ,  $R_f = 0.0037$  p.u. (d)  $D_p = 3.26\%$ ,  $R_f = 0.0037$  p.u.,  $H = 1$  s

그림 4(a)는 컨버터가 1 p.u.의 유효 전력을 출력하는 운전점에서  $D_p = 2.15\%$ ,  $R = 0.0037$  p.u. 인 안정적인 영역일 때 컨버터의 유효 전력 지령, 출력 유효 전력, PCC단의 전류 파형을 나타낸다. 유효 전력 페루프 전달함수 극점이 모두 좌반면에 위치하므로 안정적인 유효 전력 제어가 가능하다. 그러나  $D_p$ 가 경계값 근처에 위치하므로 초기 응답에서 60 Hz의 SR이 나타난다. 그림 4(b)는 그림 4(a)와 같은 조건에서  $R_f$ 를 3배로 증가시켰을 때 컨버터의 응답을 나타낸다. 그림 4(a)와 비교하였을 때 SR의 댐핑 효과가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)는 그림 4(a)와 같은 조건에서 Droop 계수를  $D_p = 3.26\%$ 의 불안정한 지점으로 증가시켰을 때 컨버터의 응답을 나타낸다. SR 응답에 해당하는 페루프 전달함수 극점이 우반면에 위치하므로 공진이 억제되지 않고 점차 발산한다. 따라서 유효 전력 응답이 안정적으로 수렴하지 않는다. 그림 4(d)는 그림 4(c)와 같은 조건에서 가상 관성  $H = 1$  s를 모의하였을 때 컨버터 응답을 나타낸다. 그림 4(c)와 달리, 같은  $D_p$ 에 대해서도 유효 전력이 안정적으로 수렴한다. 이는 관성을 모의한 경우 같은  $D_p$ 에 대해 극점들이 좌반면으로 이동하기 때문이다. 또한 Droop 제어 방식을 사용한 그림 4(a), (b), 그리고 (c)와는 달리 SR이 거의 발생하지 않지만 전달함수 변화로 peak overshoot가 나타난다.

### 3. 결론

본 논문은 그리드 포밍 컨버터의 소신호 안정도 분석 기법을 통한 제어기 파라미터 선정 방법을 연구하였다.

유효 전력 제어기의 소신호 분석을 통해 페루프 전달함수를 구하고, 전달함수의 극점을 분석하였다. 이를 통해 유효 전력이 안정적으로 수렴 가능한 파라미터 범위를 구하고, 출력 유효 전력의 응답 특성을 분석하였다. 필터 저항의 크기가 증가함에 따라 유효 전력 제어 시스템이 안정화되고 SR 댐핑 효과가 나타났으며, Droop 계수가 증가함에 따라 음저항 효과가 강화되어 시스템이 불안정해지고 SR이 크게 나타났다. 가상 관성을 모의한 경우 극점들이 복소평면 좌반면으로 이동하여 시스템이 안정화되고 SR이 강하게 억제되었다. 따라서 제안한 방법을 통해 안정적인 제어기 설계가 가능하였고 C-HiLs 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu and S. Engelken, "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review," in IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 2, pp. 93–109, 2021.
- [2] L. Zhang, L. Harnefors and H. -P. Nee, "Power-Synchronization Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 2, pp. 809–820, May 2010.