

능동 댐핑 기법에 따른 그리드 포밍 인버터의 안정도 분석

김기현*, 스티븐*, 최성휘**, 정재정*
 경북대학교*, 서울대학교**

Stability Analysis of Grid-Forming Inverter Using Various Active Damping Techniques

Ki Hyun Kim*, Obi Stephen Arinze*, Sheng Hui Cui**, Jae-Jung Jung*
 Kyungpook National University*, Seoul National University**

ABSTRACT

그리드포밍 (Grid Forming; GFM) 인버터는 동기 발전기의 동특성을 모사해 강력한 전압원으로 동작하여 독립 운전 및 계통 연계 운전이 모두 가능하며 주로 LC 필터를 통해 계통과 연결된다. GFM 인버터의 LC 필터는 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)를 개선하지만, 계통 임피던스와 함께 고조파 공진을 야기한다. 또한 GFM 인버터가 계통과 동기화하기 위해 전력을 교환하는 과정에서 동기 주파수 대역의 공진이 발생할 수 있다. 이러한 공진 현상들은 GFM 인버터의 제어 불안정성을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 GFM 인버터의 모델링을 통해 전력 계통에서 발생하는 공진에 미치는 영향을 분석하고 다양한 능동 댐핑 기법을 적용한다. 그리고, 오프라인 시뮬레이션을 통해 능동 댐핑 기법에 따른 댐핑 성능을 비교, 분석한다.

1. 서론

최근, 재생에너지의 수요가 증가함에 따라 재생에너지 발전원을 전력계통에 접속하기 위한 전력전자 인버터 기반 자원(Inverter Based Resources; IBRs)의 비중이 증가하고 있다. 기존의 교류 전력계통은 회전 관성을 제공하는 동기식 발전원을 기반으로 운영된다. IBR이 증가함에 따라, 전력 계통의 관성이 부족해지고 이는 주파수 불안정을 야기할 수 있다. 따라서, 최근 전력전자 컨버터로 가상의 동기발전기를 모사함으로써 계통에 관성과 댐핑(damping)을 제공해주는 그리드포밍(Grid Forming; GFM) 제어기법에 대한 연구가 진행되고 있다. GFM IBR은 Phase Locked Loop(PLL)를 사용하지 않고 계통과의 전력 교환을 통해 계통에 동기화하기 때문에 약계통에서 PLL의 동특성으로 인한 불안정 문제를 해소할 수 있다. 그러나 계통과의 전력 교환으로 인해 발생하는 동기화 공진과 IBR의 필터 및 계통 임피던스에 의한 LC 공진은 GFM IBR의 불안정을 야기할 수 있다. 따라서 적절한 댐핑 기법이 필요하다. 본 논문에서는 GFM IBR의 모델링을 통해 공진 성분과 이를 보상하기 위한 능동 댐핑 기법의 주파수 영역 분석을 진행하였으며, 시뮬레이션을 통해 능동 댐핑 제어에 의한 안정도 향상을 검증하였다.

2. 전력 계통의 공진 현상

전력전자 컨버터에 의해 불안정해질 수 있는 계통 공진현상은 주파수 대역에 따라 크게 두가지로 분류할 수 있다.^[1]

- 1) 고조파 공진: 고조파 공진은 수백 Hz에서 수 kHz까지의 범위에서 나타나며 송전선로 등과 같은 계통 임피던스와 LCL 필터와 같은 컨버터의 필터에 의해 발생한다.
- 2) 동기 주파수 대역 공진: 동기 주파수와 가까운 주파수 대역에서 발생하는 공진으로 주로 단락비가 1 p.u.에 가까운 약계통에서 발생하는 동기주파수 또는 2고조파 공진과 차동기 공진 등이 이에 해당한다.

전력전자 컨버터의 디지털 제어로 인한 시간지연, 내부 제어루프 및 외부 제어루프들의 동특성으로 인해 계통 공진 성분들은 불안정해질 수 있다.

3. 그리드포밍 인버터 모델링

3.1 플랜트 및 내부 전압 제어 루프

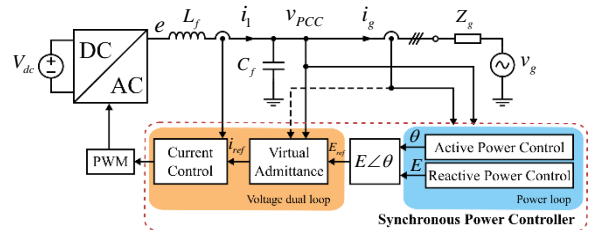


그림 1. 전체 시스템 모델

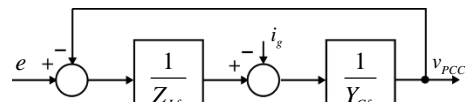


그림 2. 전압 개루프 블록 다이어그램

그림 1은 LC 필터를 통해 계통과 연결된 GFM IBR을 나타낸다. 외부 전력 제어루프에서 유효 전력과 무효 전력 제어를 통해 유효기전력 지령을 생성하고, 내부 전압 제어루프는 가상 어드미턴스와 전류 제어를 통해

PWM 지령을 생성한다.

계통과 인버터를 연결하는 LC 필터는 그림 2와 같은 개루프 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있으며, 이를 통해 다음과 같은 전달함수들을 얻을 수 있다.

$$Z_{ol} = \frac{v_{PCC}}{-i_g} = \frac{Z_{Lf}}{1 + Z_{Lf}Y_{Cf}} \quad (1)$$

$$G_{ev} = \frac{v_{PCC}}{e} = \frac{1}{1 + Z_{Lf}Y_{Cf}} \quad (2)$$

$$G_{ii} = \frac{i_g}{i_g} = \frac{1}{1 + Z_{Lf}Y_{Cf}} \quad (3)$$

$$G_{ei} = \frac{i_g}{e} = \frac{Y_{Cf}}{1 + Z_{Lf}Y_{Cf}} \quad (4)$$

식 (1)~(4)와 내부 전압제어루프를 통해 그림 3과 같은 전압 폐루프 블록 다이어그램을 얻을 수 있다.

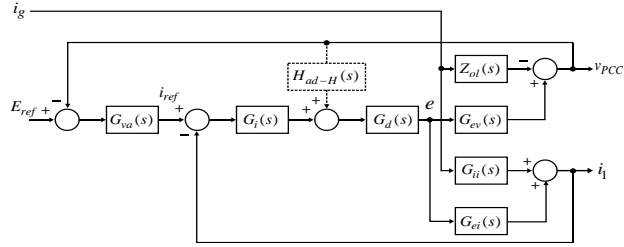


그림 3. 전압 폐루프 블록 다이어그램

$G_{va}(s)$ 는 가상 어드미턴스, $G_i(s)$ 는 전류제어기, $G_d(s)$ 는 디지털 제어에 의한 시간지연의 전달함수이며, $H_{ad-H}(s)$ 는 필터 커패시터에 병렬로 연결된 저항을 모사하는 능동댐핑 제어를 구현하는 피드백 보상기이다.

$$T_v = \frac{G_{ev}G_dG_iG_{va}}{1 - G_{ev}G_dH_{ad-H} + G_{ei}G_dG_i} \quad (5)$$

$$Z_o = -\frac{e}{i_g} = \frac{Z_{ol} \cdot (1 + G_{ei}G_dG_i) + G_{ev}G_dG_iG_{ii}}{1 - G_{ev}G_dH_{ad-H} + G_{ei}G_dG_i + G_{ei}G_dG_iG_{va}} \quad (6)$$

$$G_v = \frac{e}{e_{ref}} = \frac{T_v}{1 + T_v} \quad (7)$$

그림 3으로부터, 전압 루프 이득 T_v 와 전압 폐루프 전달함수 G_v , 출력 임피던스 Z_o 를 구할 수 있다.

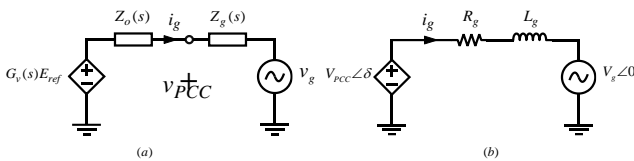


그림 4. (a) 임피던스 모델
(b) 내부 제어루프 동특성을 무시한 간략화 모델

식 (6)과 (7)을 통해 그림 4(a)의 임피던스 모델을 구할 수 있다. 계통 임피던스와 출력 임피던스의 비 Z_o/Z_g 를 통해 시스템 불안정성을 분석할 수 있다. 한편, 내부 전압제어의 대역폭이 외부 전력 제어의 대역폭보다 매우 크기 때문에 내부 전압 제어의 동특성을 무시하고 그림 4(b)와 같이 나타낼 수 있다.

3.2 외부 전력 제어 루프

교류 전력 시스템에서 그림 4(b)와 같이 두개의 노드 간의 전력 교환은 선로의 저항성분을 무시했을 때, 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$P = \frac{V_{PCC}V_g \sin \delta}{X} \quad (8)$$

$$Q = \frac{V_{PCC}^2 - V_{PCC}V_g \cos \delta}{X} \quad (9)$$

이때 $X = \omega_g L_g$ 로 계통 리액턴스이다. 전력 시스템에서 유효전력과 부하 각, 무효전력과 전압 크기의 관계를 해석하기 위해 동특성이 느린 동기발전기 모델에서는 전자기적 과도현상을 반영하지 않는 준 정적(Quasi-static) 모델을 사용한다. 그러나, 동특성이 빠른 전력전자 컨버터를 분석하기 위해서는 전자기적 과도현상을 무시할 수 없다. 따라서 이를 반영한 더 정확한 수학적 모델이 필요하다.^[2] 동기 좌표변환을 통해 d축에 계통 전압을 동기화 시키고, 그림 4(b)의 키르히호프 회로방정식을 구하면 식 (10)과 같다.

$$L \frac{di_{gd}}{dt} = V_{PCC} \cos \delta - V_g - R_g i_{gd} + \omega_g L i_{gq} \quad (10)$$

$$L \frac{di_{gq}}{dt} = V_{PCC} \sin \delta - R_g i_{gq} - \omega_g L i_{gd}$$

GFM IBR이 강력한 전압원으로 동작하여 전압 크기가 변하지 않는다고 가정하고 ($V_{PCC} = V_{PCC0}$) 식 (10)의 소신호 모델을 구하면 식 (12)와 같으며 아래 첨자 “0”은 동작점, “d,q”는 동기 좌표계를 나타낸다.

$$\delta = \delta_0 + \Delta \delta, \quad i_{gd} = I_{gd0} + \Delta i_{gd}, \quad i_{gq} = I_{gq0} + \Delta i_{gq} \quad (11)$$

$$L \frac{d\Delta i_{gd}}{dt} = -V_{PCC0} \sin \delta_0 \Delta \delta - R_g \Delta i_{gd} + \omega_g L \Delta i_{gq} \quad (12)$$

$$L \frac{d\Delta i_{gq}}{dt} = V_{PCC0} \cos \delta_0 \Delta \delta - R_g \Delta i_{gq} - \omega_g L i_{gd}$$

$$\Delta i_{gd} = \frac{V_{PCC0} \omega_g L_g \cos \delta_0 - V_{PCC0} (sL_g + R) \sin \delta_0}{(sL_g + R_g)^2 + (\omega_g L_g)^2} \Delta \delta \quad (13)$$

$$\Delta i_{gq} = \frac{V_{PCC0} \omega_g L_g \sin \delta_0 + V_{PCC0} (sL_g + R) \cos \delta_0}{(sL_g + R_g)^2 + (\omega_g L_g)^2} \Delta \delta$$

식 (12)를 통해 식 (13)으로 나타나는 $\Delta \delta$ 와 Δi_g 간의 전달함수를 구할 수 있다. GFM IBR이 계통으로 전달하는 순시 유효전력은 식 (14)와 같으므로 최종적으로 $\Delta \delta$ 와 ΔP 간의 전달함수를 구할 수 있다.

$$P = \text{Re}\{e_i^*\} \quad (14)$$

$$\Delta P = \begin{bmatrix} I_{gd0} \\ I_{gq0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta v_{pcc-d} \\ \Delta v_{pcc-q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{PCC-d0} \\ V_{PCC-q0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta i_{gd} \\ \Delta i_{gq} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Delta P = \frac{V_g V_{PCC0} \omega_g L_g \cos \delta_0 - V_g V_{PCC0} (sL_g + R_g) \sin \delta_0}{(sL_g + R_g)^2 + (\omega_g L_g)^2} \Delta \delta \quad (16)$$

식(16)의 특성방정식에서 R_g 는 댐핑 성분을 의미한다. 실제 계통에서 선로의 저항성분은 매우 작기 때문에 R_g 성분을 무시하게 된다면 계통 주파수의 유효전력 동기화 공진이 나타나게 된다. 따라서 능동 댐핑 제어 기법을 통해 공진 성분을 적절하게 댐핑 시켜주어야 한다.

GFM IBR이 무효 전력을 출력할 때, 부하각이 일정하여 $\delta = \delta_0$ 라고 가정하면 동일한 방식을 통해 전압 크기와 무효전력 간의 전달함수를 도출할 수 있다.

$$\Delta Q = \frac{V_{PCC0} \omega_g L_g \cos \delta_0 - V_{PCC0} (sL_g + R_g) \sin \delta_0}{(sL_g + R_g)^2 + (\omega_g L_g)^2} \Delta E \quad (17)$$

식 (17)에서 무효전력 또한 계통주파수 근처에서 공진

성분이 나타나게 된다. 또한 식 (16)과 식 (17)은 유효 전력과 무효전력의 커플링을 생략한 간략화 모델이다.

3.3 능동 댐핑 제어 구현

앞선 모델링을 통해 플랜트 및 내부 전압 루프는 주로 고조파 공진 성분에 영향을 주고, 외부 전력 루프는 주로 동기 주파수 대역 공진 성분에 영향을 주는 것을 확인했다. 고조파 공진 성분은 댐핑을 위한 수동 저항 소자가 추가된 LC 필터의 전달함수를 $H_{ad-H}(s)$ 를 통해 구현함으로써 능동 댐핑 할 수 있으며, 외부 전력 루프에서 나타나는 동기화 공진 성분은 계통 전류를 $H_{ad-S}(s)$ 를 통해 피드백하여 전압 지령에서 빼준다면, 식 (18)의 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\Delta P = \frac{V_g V_{PCC0} \omega_g L_g \cos \delta_0 - V_g V_{PCC0} (sL_g + R_g + H_{ad-S}(s)) \sin \delta_0}{(sL_g + R_g + H_{ad-S}(s))^2 + (\omega_g L_g)^2} \Delta \delta \quad (18)$$

4. 시뮬레이션 결과

3절에서 GFM IBR의 모델링을 통해 전력전자 컨버터와 계통 간의 상호작용을 분석하였다. 능동 댐핑 제어 유무에 따른 GFM IBR의 안정성을 분석하기 위해 그림 1과 같은 250 kW 급의 GFM IBR이 3 s에 1 p.u.의 유효전력을 출력하는 시뮬레이션을 수행하였다.

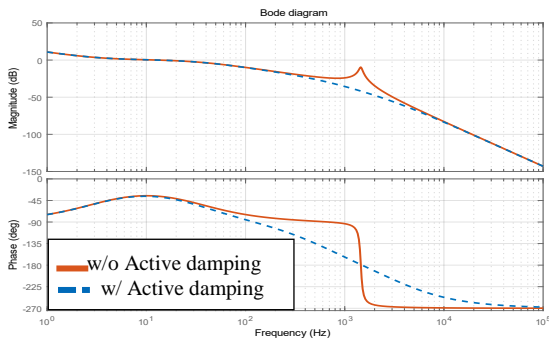


그림 5. 능동 댐핑 유무에 따른 내부 전압 루프 이득 보드선도

그림 5에서, 내부 전압 루프에 LC 공진성분을 댐핑하기 위한 능동 댐핑 제어를 적용한다면, 이득 여유가 9.56dB 에서 42.2dB 로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에서, 외부 전력 루프에 능동 댐핑 제어를 적용함으로써 위상 여유가 -24° 인 불안정한 시스템이 안정해진다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 능동 댐핑 제어가 없다면 유효전력 지령을 출력하지 못한다.

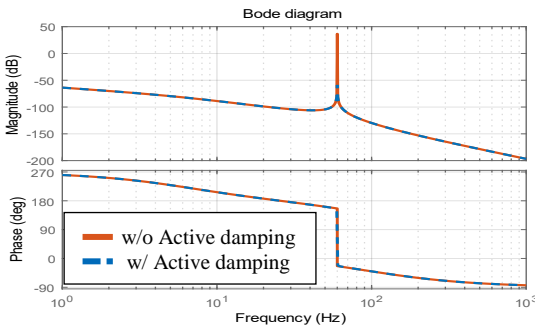


그림 6. 능동 댐핑 유무에 따른 외부 전력 루프 이득 보드선도

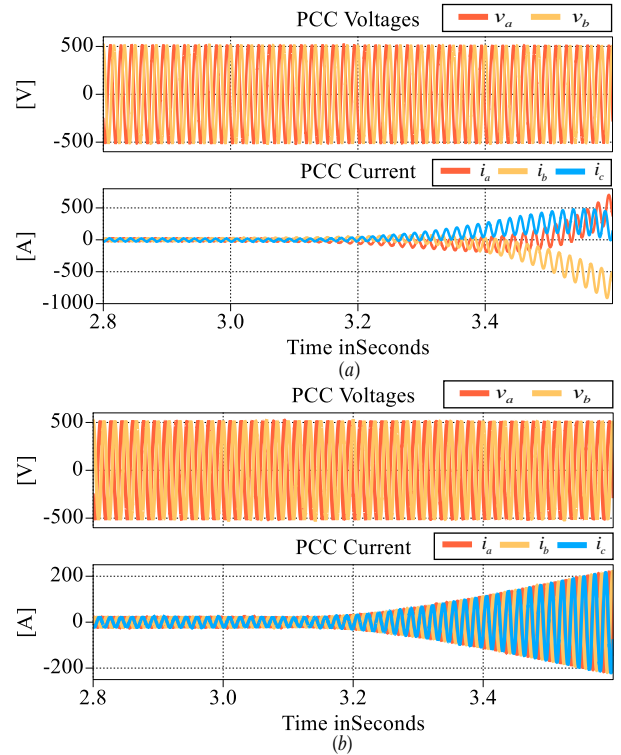


그림 7. 시뮬레이션 결과 (a)w/o 능동 댐핑 (b)w/ 능동 댐핑

5. 결론

본 논문에서는 그리드포밍 인버터가 계통과 연계되었을 때, 서로 간의 상호작용으로 인해 시스템이 불안정해질 수 있는 공진 현상에 대해 그리드포밍 인버터를 모델링함으로써 분석하였다. 상대적으로 대역폭이 큰 내부 제어루프와 플랜트의 경우, 주로 인버터의 출력 임피던스와 계통 임피던스 간의 고조파 공진에 영향을 미치며, 상대적으로 대역폭이 작은 외부 전력 제어루프의 경우, 계통과 전력교환을 통해 동기화하는 과정에서 동기 주파수 대역 공진에 영향을 준다. 따라서, 그리드 포밍 인버터가 안정적으로 동작하기 위해서 공진 성분의 적절한 댐핑이 요구되며 여러 종류의 능동 댐핑 기법을 통해 구현 가능하다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. R22TA06)

참고 문헌

- [1] L. Harnefors, X. Wang, A. G. Yepes and F. Blaabjerg, "Passivity-Based Stability Assessment of Grid-Connected VSCs—An Overview," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 116–125, March 2016.
- [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.