

$r = [\delta_2^* \delta_2^*]^T$ 는 기준 전류 벡터이다.

2.2.2 공진 제어

계통외란으로 인해 발생하는 저차 고조파를 보상하기 위해 공진제어기를 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{bmatrix} \delta_{1i}^d(k+1) \\ \delta_{2i}^d(k+1) \\ \delta_{1i}^q(k+1) \\ \delta_{2i}^q(k+1) \end{bmatrix} = A_{rci} \begin{bmatrix} \delta_{1i}^d(k) \\ \delta_{2i}^d(k) \\ \delta_{1i}^q(k) \\ \delta_{2i}^q(k) \end{bmatrix} + B_{rci} \begin{bmatrix} e^d(k) \\ e^q(k) \end{bmatrix} \text{ for } i = 6, 12 \quad (4)$$

위 식에서

$$A_{rci} = \begin{bmatrix} 2\cos(j\omega T_s) & 1 & & \\ & -1 & 0 & \\ & & 2\cos(j\omega T_s) & 1 \\ & & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{rci} = \begin{bmatrix} \cos(j\omega T_s) & \\ -1 & \\ & \cos(j\omega T_s) \\ & -1 \end{bmatrix}$$

i 는 고조파의 차수, T_s 는 샘플링 시간이다.

2.3 전 상태 관측기

본 논문에서 전류 제어기를 구성하기 위해 관측기를 통해 그리드 측과 인버터 측 전류, 커패시터 측 전압을 추정한다. 이를 통해 제어기 설계에 필요한 센서를 줄여 시스템의 경쟁력을 향상시키고 복잡성을 줄인다.

$$\hat{x}(k+1) = A_d \hat{x}(k) + B_d u(k) + D_d e(k) + G(y(k) - C_d \hat{x}(k)) \quad (5)$$

$$\tilde{x}(k+1) = (A_d - GC_d) \tilde{x}(k) \quad (6)$$

위의 식에서 \tilde{x} 를 도입하여 입력과 출력을 같은 시간에 계산하여 관측기의 정확성을 높인다.

$$\bar{x}(k+1) = A_d \bar{x}(k) + B_d u(k) + D_d e(k) \quad (7)$$

$$\hat{x}(k+1) = \bar{x}(k+1) + K_e [y(k+1) - C_d \bar{x}(k+1)] \quad (8)$$

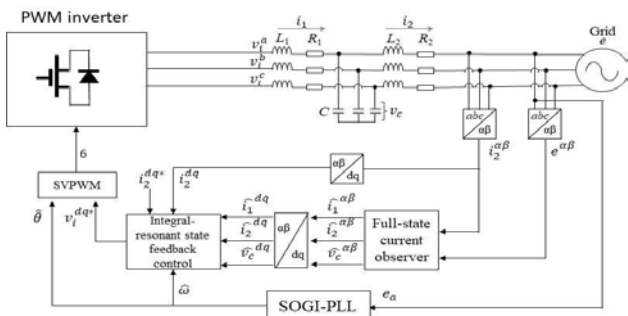
$$\bar{x}(k+1) = A_d \bar{x}(k) + B_d u(k) + A_d K_e [y(k) - C_d \bar{x}(k)] \quad (9)$$

$$\tilde{x}(k+1) = (A_d - GC_d A_d) \tilde{x}(k) \quad (10)$$

위의 식은 최근 측정값을 이용하는 전 상태 관측기를 나타낸다. K_e 는 전류 관측 이득 값, $x = [\delta_2^{\alpha\beta} \delta_1^{\alpha\beta} v_c^{\alpha\beta}]^T$ 는 시스템 상태 벡터, \hat{x} 는 예측 상태 벡터, \tilde{x} 는 시스템 오차 벡터, $u = [v_i^{\alpha\beta}]^T$ 는 시스템 입력, $e = [e^{\alpha\beta}]^T$ 는 그리드 전압 벡터이다.

2.4 주파수 적응형 전류 제어기

그림 2는 SOGI-PLL 기반 계통연계 LCL 인버터의 주파수 적응형 전류 제어기의 블록도이다. 전 상태 관측기는 시스템의 계산량을 줄이기 위해 $\alpha\beta$ 프레임에서 설계하며, 제어 입력과 시스템 출력으로부터 인버터의 모든 시스템 상태 변수를 추정한다. 전류 제어기는 LCL 필터의 공진과 계통전압 외란 제거를 위해 dq 프레임에서 공진제어와 적분제어를 사용한다. 또한, 불평형 전압이 발생하여도 정확하게 위상을 추종하기 위해 SOGI-PLL을 구현하여 계통외란과 주파수 변동으로 인해 발생하는 주파수 검출 성능을 향상시킨다.

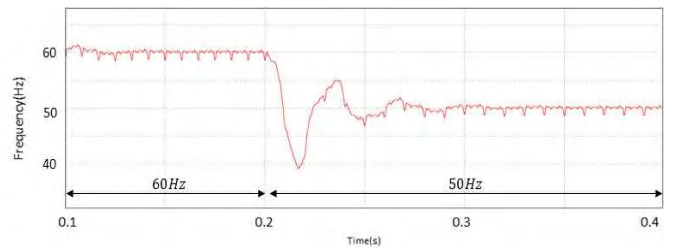


(그림 2) SOGI-PLL 기반 계통연계 LCL 인버터의 주파수 적응형 전류 제어기

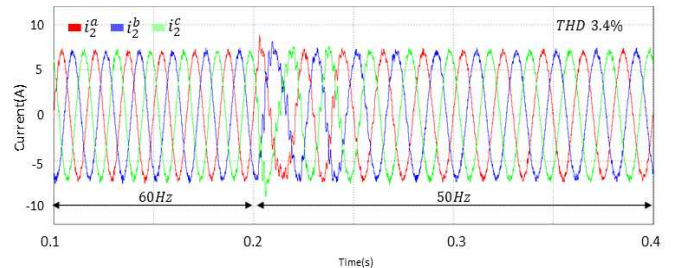
그림 2에서 R_1, R_2 는 필터 저항, L_1, L_2 는 필터 인덕턴스, C_f 는 커패시터 필터, ω 는 계통 전압의 각속도, e 는 계통 전압, v_i 는 인버터 전압이다.

2.5 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 PSIM 시뮬레이션이 수행되었다. 제안된 기법의 강인성을 확인하기 위해 외란이 포함된 계통전압 하에서 시뮬레이션이 수행되었으며 5차, 7, 11, 13차 고조파가 각각 5%가 포함되었다. 그림 3은 계통 주파수 변화 시 SOGI-PLL의 주파수 추정 응답 특성을 나타내며 그림 4는 계통 주파수 변화에 따른 제어기의 3상 전류 파형을 나타낸다. 각각의 파형에서 주파수 변화 시점은 0.2s로 동일하다.



(그림 3) SOGI-PLL의 주파수 추정 결과



(그림 4) 3상 계통 전류 응답

3. 결론

본 논문은 주파수 변동 및 외란이 포함된 계통 하에서 높은 전류 품질을 얻을 수 있는 주파수 적응형 전류 제어기법을 제시하였다. 제안된 제어는 LCL 필터를 사용하는 계통연계 인버터의 상태공간 모델을 이산화하여 체계적인 방법으로 시스템을 설계하였으며 이를 위해 전 상태추환 제어기법과 전 상태 관측기가 설계되었다. 전 상태 관측기는 $\alpha\beta$ 프레임에서 센서의 수를 줄여 계통연계 인버터 시스템의 비용과 복잡성을 현저히 감소시킨다. 또한 SOGI-PLL을 통해 불평형 전압이 발생하여도 정확하게 위상을 추종할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션을 통해 주파수 변동 및 외란이 포함된 계통 하에서 높은 전류 품질을 얻는 것이 가능하다는 것을 확인하였다.

본 논문은 과학기술정보통신부 정보통신망의인재양성사업의 지원을 통해 수행한 ICT멘토링 프로젝트의 결과물입니다.

참고문헌

- [1] Bimarta. R, Tran. T.V, Kim. K.-H, “Frequency-Adaptive Current Controller Design Based on LQR State Feedback Control for a Grid-Connected Inverter under Distorted Grid”, *Energies*, 11, 2674, 2018.
- [2] Golestan. S, Monfared. M, Guerrero. J. M, “Second Order Generalized Integrator Based Reference Current Generation Method for Single-Phase Shunt Active Power Filters Under Adverse Grid Conditions.”, *PEDSTC*, Vol.4, pp. 510-517, 2013.