

단상 계통연계형 전력변환 시스템에서 시스템 모델링을 이용한 PLL 성능개선

김선민, 고영종, 이교범
아주대학교

Improvement of PLL-Performance for a Single-Phase Grid-Connected Power Conversion System using a System Modeling

Sun-Min Kim, Young-Jong Ko, and Kyo-Beum Lee
Ajou University

ABSTRACT

계통연계 인버터 제어 시 계통 전압과 동상인 전류를 공급해 주기 위해 반드시 계통 전압의 위상 정보가 필요하다. 기존의 PLL 방법은 계통 전압에 고조파가 존재하지 않을 시에 검출된 위상 값은 정확하지만, 고조파 존재 시 정확한 위상 값을 얻을 수 없다. 본 논문에서는 전차원 상태 관측기를 이용하여 기본파 성분과 고조파 성분을 분리하여 검출된 위상의 정상상태 오차를 감소시킬 수 있고, 저역통과필터를 고려한 PLL 시스템의 모델링을 이용하여 동특성을 개선하는 방법을 제안하였다. 이를 모의실험을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지의 상용화에 따른 분산전원 시스템에 대한 관심은 상용전원과 관련된 전력전자 기기의 활발한 연구로 이어지고 있다. 이러한 전력전자 기기의 인버터 제어에는 계통 전압의 정확한 위상각 정보와 주파수 정보가 필수적이다. 기존의 단상 시스템에서 이용되는 방식은 전역통과필터를 이용하는 방법과 1차 저역통과필터를 이용하는 방법, 2차 저역통과 필터를 이용하는 방법이 있다.^[1] 실제 계통 전원은 고조파 성분과 잡음 등을 포함하고 있어 기존의 방식을 이용하여 검출된 위상각은 정상상태 오차를 가진다.

본 논문에서는 주파수 변화와 phase jump 등 계통 사고로 인한 전원 급변 시 빠른 동특성을 갖기 위해 저역통과 필터를 고려한 PLL 모델링을 하여 제어기 계인을 구한다. 또한, 고조파 성분이 있는 계통 전압을 전차원 상태 관측기를 이용하여 기본파 성분과 고조파 성분을 분리하고 기본파 성분을 이용하여 검출된 위상각의 정상상태 오차를 줄일 수 있다. 제안한 방법은 PSIM 모의실험을 통해 검증하였다.

2. 본 문

2.1 전체 시스템 구성

본 논문에서 제안한 단상 계통의 위상각, 주파수, 크기를 실시간으로 추정할 수 있는 시스템은 그림 1과 같고, 이는 전차원 상태 관측기, 좌표변환, 저역통과필터, PI 제어기로 구성되어 있다. 전차원 상태 관측기는 측정된 단상 전압을 입력으로 받아 기본파 성분만을 갖는 가상 2상 전압을 생성하고 가상 2상 전압을 좌표변환과 Arctan식을 통하여 입력전압의 위상각을 추정한다. 이 과정에서 센서 잡음과 기타 잡음 등을 제거하

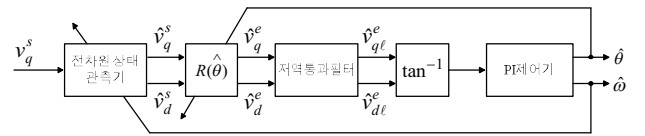


그림 1 제안된 단상 위상각 추정 시스템
Fig. 1 A proposed system of single phase estimation

기 위해 저역통과필터를 사용한다. 다음 장에서는 저역통과 필터를 고려한 PLL 시스템의 모델링과 전차원 상태 관측기의 구조를 알아본다.

2.2 PLL 시스템 모델링

앞 장에서 언급한 것과 같이 PLL 시스템에서 센서잡음과 스위칭잡음 등에 의한 영향을 줄이기 위하여 저역통과필터를 사용한다. 하지만 저역통과필터에 의해 전체시스템의 안정성과 동특성에 악영향을 줄 수 있어 이를 고려한 모델링이 필요하다.^[2]

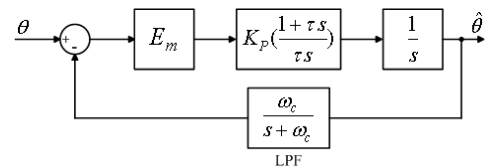


그림 2 저역통과필터를 고려한 PLL 시스템 블록도
Fig. 2 PLL system diagram with consideration of LPF

그림 2는 저역통과필터를 고려한 PLL 시스템 블록도이다. 저역통과필터를 1차 시스템으로 가정하면 폐루프 전달함수는 3차 시스템이다. 3차 시스템 모델을 정리하여 영점과 극점을 상쇄시켜 식 (1)과 같이 나타내고 ζ 와 ω_n 에 의해 시스템 응답성을 설계한다.

$$H_{model} = \frac{s+a}{s+a} \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

전체 시스템 대역폭 ω_n 을 결정하면 식 (2)를 이용하여 저역통과필터의 차단주파수와 PLL 시스템의 PI제어기 계인이 결정되고 이를 통하여 시스템의 동특성 및 안정성을 향상시킨다.

$$\omega_n = 1 + 2\zeta\omega_n \quad (2)$$

$$K_P = \frac{2\zeta\omega_n}{E_m}, \quad \tau = \frac{E_m \cdot K_P \cdot \omega_c}{\omega_n^2} \quad (3)$$

2.3 전압 관측기를 이용한 기본파 성분 추출

고조파 성분이 있는 실제 계통 전압은 기본파 성분과 고조파 성분의 합으로 나타낼 수 있고 이는 식 (4)과 같다.

$$\begin{aligned} v_q^s &= E \cdot \sin(\omega t) \\ v_d^s &= E \cdot \cos(\omega t) \\ v_{qn}^s &= E_n \cdot \sin(n\omega t + \theta_n) \\ v_{dn}^s &= E_n \cdot \cos(n\omega t + \theta_n) \end{aligned} \quad (4)$$

일반적인 전차원 상태 관측기 방정식은 식 (5)과 같고 기본파 가상 2상 전압과 고조파 가상 2상 전압을 검출하여 PLL 시스템에 사용된다.^[3]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn}^s \\ \hat{v}_{dn}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\omega} & 0 & 0 \\ \hat{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n\hat{\omega} \\ 0 & 0 & -n\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn}^s \\ \hat{v}_{dn}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \\ \ell_3 \\ \ell_4 \end{bmatrix} y - [1 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn}^s \\ \hat{v}_{dn}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y = [1 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \\ v_{qn}^s \\ v_{dn}^s \end{bmatrix}$$

식 (5)에서 $[\ell_1 \ \ell_2 \ \ell_3 \ \ell_4]$ 는 상태관측기의 비례이득행렬이며 시스템 특성방정식의 근으로 결정한다. 식 (5)의 특성방정식이 4중근을 갖는다고 가정하면 비례이득은 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \\ \ell_3 \\ \ell_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha \\ \frac{2\alpha^2 - n^2\hat{\omega}}{\hat{\omega}} \\ -2\alpha \\ \sqrt{\frac{8\alpha^4}{n\hat{\omega}^2 + 2\hat{\omega}^2(1-3n)}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 시뮬레이션

제한한 위상각 추정 알고리즘을 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 입력전압원은 기본파성분과 5차고조파성분을 주입하였고 위상제어기는 Arctan방식을 사용하였으며 제어기 계인은 모델링을 통하여 얻은 값을 사용하였다.

그림 3는 고조파가 주입된 입력전압을 전차원 상태관측기를 통하여 기본파와 고조파성분을 분리한 결과이고 5차 고조파성분이 제거된 기본파성분이 추정됨을 확인 할 수 있다.

그림 4는 고조파성분을 갖고 있는 전압을 이용하여 추정된 위상각과 상태관측기를 통하여 얻은 기본파 전압을 이용하여 추정된 위상각이다. 고조파성분을 갖는 전압을 이용한 경우 추정된 위상각에 리플성분이 존재하지만 상태관측기를 통하여 추정된 전압을 이용하여 리플성분을 제거되어 위상각 오차감소를 확인하였다.

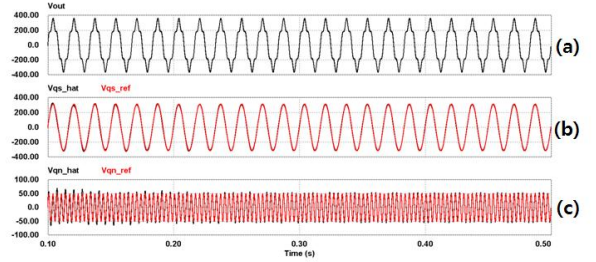


그림 3 전차원 상태관측기 (a) 고조파성분이 주입된 입력전압, (b)추출된 기본파 전압, (c)추출된 5차고조파 전압

Fig. 3 A full order observer (a)Input voltage with harmonic, (b)Extracted fundamental voltage, (c)Extracted 5th-order voltage

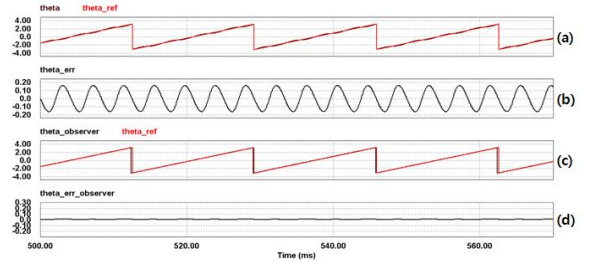


그림 4 고조파성분을 갖고있는 입력전압을 이용한 경우 (a)위상각, (b)위상각 오차, 추출된 기본파 전압을 이용한 경우 (c)위상각, (d)위상각 오차

Fig. 4 (a)Phase, (b)Phase error using input voltage with harmonic, (c)Phase, (d)Phase error using extracted fundamental input voltage

4. 결론

본 논문에서는 단상 계통연계형 전력변환 시스템에서 PLL성능을 개선하기 위한 방법을 제안하였다. 안정된 동특성을 갖기 위하여 저역통과 필터가 고려된 PLL시스템 모델링을 통해 제어기 계인을 계산하였다. 그리고 계통전압에 고조파성분이 존재하는 경우 전차원 상태관측기를 통하여 기본파 성분을 추정하고, 이를 이용해 위상각 오차가 감소됨을 검증하였다.

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010019658)

참고 문헌

- [1] Shinji Shinnaka, "A Robust Single-Phase PLL System With Stable and Fast Tracking", *IEEE Trans.*, Vol. 44, No. 2, pp. 624-633, 2008, March-April.
- [2] 최형진, 송승호, 정승기, 최주엽, 최익, "3상 계통연계형 인버터를 위한 SRF-PLL 시스템의 동특성 개선", *전력전자학회논문지* 제14권 제2호, pp.134-141, 2009. 4.
- [3] 황희훈, 최중우, "상태관측기를 이용한 단상 PLL제어의 성능 개선", *전력전자학회논문지*, 제14권 제2호, pp.96-104, 2009. 4.