

계통 연계형 태양광 발전 시스템을 위한 디지털 PLL 제어

김 용 균, 최 종 우, 김 흥 근, 이 동 춘, 최 영 태, 김 진 규

Digital PLL Control for Grid-Connected Photovoltaic System

Yong-Kyun Kim, Jong-Woo Choi, Heung-Geun Kim, Dong-Choon Lee, Young-Tae Choi, Jin-Kyu Kim

Abstract - The frequency and phase angle of the utility voltage are important in many industrial systems. In this paper, the analysis and generalized approach of single-phase PLL control have been presented. The experimental results have been presented and demonstrated the feasibility of proposed methods.

1. 서 론

AC/DC 컨버터, UPS(Uninterruptible Power Supply), 대체 에너지 발전 시스템 등의 적용 분야에서 정확하고 빠른 계통 전압의 위상 검출은 지령 신호를 만드는데 반드시 필요한 정보이다.[1][2] 그리고 계통 전압에 노이즈나 외란이 유입될 경우에도 계통전압의 정확한 위상이 검출되어야 한다. 3상의 경우, 3상 전압을 정지좌표계로 변환하면, 전압의 벡터각이 위상이 되므로 쉽게 위상검출이 이루어진다. 하지만 단상의 경우에는 이러한 방법이 적용되지 않으므로 위상 및 주파수 검출이 어렵다.[3] 단상에서 가장 보편화 된 방법 중 영점 검출 방식은 영점에서만 위상을 검출하기 때문에 추정속도가 느리며 순시적인 위상을 검출할 수 없고 노이즈에 민감하다. 본 논문에서는 가장 2상 방식에 의한 주파수 및 위상 검출의 일반적인 원리와 구현 방식을 제시하고 실험을 통해 타당성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 영점 검출 방법

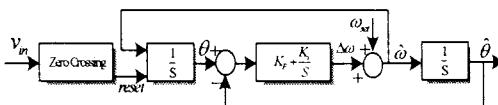


그림 1. 영점 검출 방법

그림 1은 영점 검출 방법의 구조이다. 영점 검출 방법은 계통 전압의 영점을 검출하여 위상을 초기화한다. 즉, 반주기마다 영점을 지나는 점을 찾아내어 위상(0과 π)을 검출하고 추정 주파수로 위상($\hat{\theta}$)을 계산한다.

또, 영점에서 실제 위상(0과 π)과 추정 위상($\hat{\theta}$)을 PI 제어하여 주파수($\hat{\omega}$)를 추정한다. 그림 1에서 ω_{ref} 는 시스템의 각주파수 설정치이다.

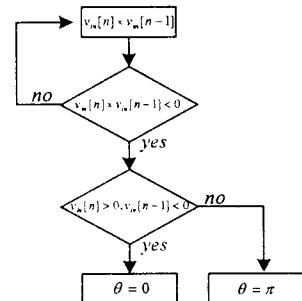


그림 2. 영점 검출 방법의 순서도

그림 2는 영점 검출 방법의 순서도이다. 계통 전압을 샘플링하여 현재 값과 과거값을 곱셈 연산하여 영점을 검출한다. 이 때 현재 값이 0보다 크면 위상이 0인 경우이고 현재 값이 0보다 작으면 위상이 π 인 경우이다. 영점 검출 방법의 단점은 노이즈에 민감하다는 것이다. 계통전압에 노이즈가 유입되어 영점을 여러번 지나게 되면 계통전압의 위상검출에 오류가 발생할 수 있다.

2.2 가상 2상 위상 검출 방식의 구조와 원리

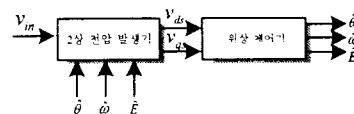


그림 3. 가상 2상 위상 검출기

그림 3은 가상 2상 위상 검출기의 구조이다. 2상 전압 발생기는 입력 전압 v_{in} 를 통해 위상차가 $\pi/2$ 인 v_d' 와 v_q' 를 발생한다. 이 두 신호를 위상제어기를 통해 제어하여 추정위상각($\hat{\theta}$)과 추정주파수($\hat{\omega}$)와 추정진폭(\hat{E})이 출력된다.

2.2.1 2상 전압 발생기

2상 전압 발생기는 그림 3에서 입력 전압이 다음과 같이 주어졌을 때

$$v_{in} = E \sin(\omega t) = E \sin(\theta) \quad (1)$$

위상차가 $\pi/2$ 인 다음과 같은 v_d' 와 v_q' 를 발생한다.

$$v_d' = E \sin(\omega t) = v_{in} \quad (2)$$

$$v_q' = E \cos(\omega t) \quad (3)$$

실제 구현시 입력 전압의 노이즈를 제거하기 위한 LPF(Low Pass Filter)를 삽입한다. LPF에 의한 진폭의 감소를 보상하기 위해 이득 K를 곱하고, LPF에 의한 위상 지연을 보상하기 위하여 보상위상(θ_{com})을 더해 준다. LPF의 전달 함수를 $F(s)$ 라고 하면 이득 K와 보상위상(θ_{com})은 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{|F(j\omega)|} \quad (13)$$

$$\theta_{com} = \angle F(j\omega) \quad (14)$$

3. 실험

앞에서 설명한 2상 전압 발생기와 위상 제어기를 조합하면 다음과 같은 표 1의 여섯 가지의 PLL 제어방식을 구성할 수 있다.

	2상 전압 발생기	위상 제어기
방식 I	테이블	\arctan
방식 II	추정위상각과 추정진폭	\arctan
방식 III	2차 필터	\arctan
방식 IV	테이블	동기좌표계
방식 V	추정위상각과 추정진폭	동기좌표계
방식 VI	2차 필터	동기좌표계

표 1. PLL 제어방식

다음과 같은 조건에서 여섯가지 방법에 대한 초기 추정특성과 정상상태 추정특성을 실험하였다. 입력 전압은 $220V_{rms}$, $60Hz$ 이며, 노이즈에 대한 강인성을 검증하기 위해 노이즈($30V_{peak}$, $400Hz$)를 주입하였고 추정기는 실제 위상이 π 일 때부터 동작시켰다.

추정 입력 전원은 추정진폭(\hat{E})과 추정위상각($\hat{\theta}$)를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$\hat{v}_{in} = \hat{E} \sin \hat{\theta} \quad (15)$$

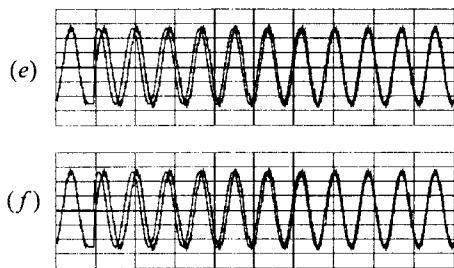
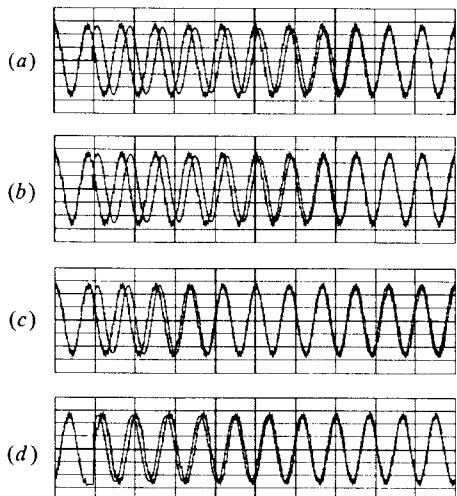


그림 9. 초기 추정 특성(입력 전원과 추정 입력 전원)

- (a) 방식 I
- (b) 방식 II
- (c) 방식 III
- (d) 방식 IV
- (e) 방식 V
- (f) 방식 VI
(120V/div, 20ms/div)

그림 9에서는 여섯가지 PLL 제어방식에 대한 초기 추정 특성을 나타내고 있다. 노이즈가 주입된 입력 전압의 위상을 잘 추정하고 있는 것을 볼 수 있다. 각 방법에 따라 과도 상태의 응답이 다르게 나타나지만 150msec 이내에는 입력 전압의 위상을 추정하고 있다.

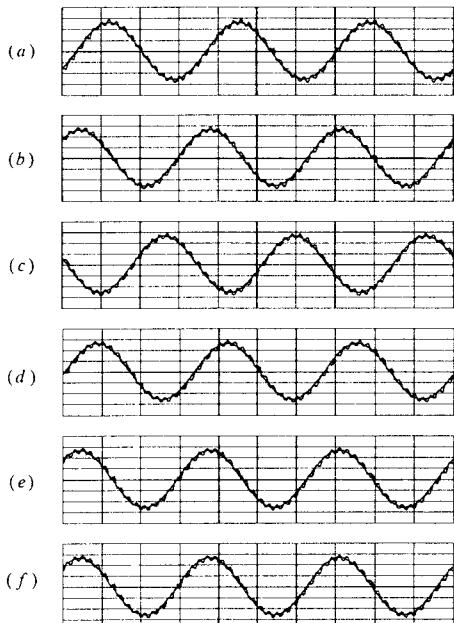


그림 10. 정상 상태 추정 특성(입력 전원과 추정 입력 전원)

- (a) 방식 I
- (b) 방식 II
- (c) 방식 III
- (d) 방식 IV
- (e) 방식 V
- (f) 방식 VI
(120V/div, 20ms/div)

그림 10은 정상 상태의 추정 특성을 보이고 있다.

여섯가지의 PLL 제어방식이 모두 정상상태에서 입력 전압의 위상을 정확하게 추정하고 있는 것을 볼 수 있고 노이즈에

대한 강인성을 검증할 수 있다.

4. 결론

가상 2상 위상 검출기의 여섯가지 PLL 제어방식의 주파수 및 위상 검출의 일반적인 원리와 구현 방식을 제시하였고 실험을 통해 노이즈에 대한 강인성과 추정 특성을 검증하였다.

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1]SaKamoto S,Izumi T,Yokoyama T,Haneyoshi T,"A new method for digital PLL control using estimated quadrature two phase frequency detection." in PCC Osaka 2002 proceedings,Volume 2, pp .671-676
- [2]Guan-Chyu Hsieh, Hung, J.C,"Phase-locked loop techniques loop techniques.A survey",IEEE Transaction on Industrial Electronics, Volume 43, Issue 6,Dec, 1996,pp.609-615
- [3]Arruda L.N.,Silva S.M.,Filho B.J.C., "PLL structures for utility connected systems",in IAS'2001,2001,Volume 4,pp 2655-2660