

가상 2상 방식을 사용한 단상 PLL 알고리즘의 성능 비교

이용석, 지준근

순천향대학교 전기통신시스템공학과

Performance Comparison of Single-Phase PLL Algorithms Using Virtual 2-Phase Strategy

Yong-Seok Lee, Jun-Keun Ji

Dept. of Electrical Communication System Engineering, Soonchunhyang University

Abstract - This paper presents a comparative study of single-phase PLL algorithms using virtual 2-phase strategy. Simulation and experimental results, including operation of the PLL structures introduced in reference papers, are presented to allow a performance comparison of the PLL algorithms.

1. 서 론

AC/DC 컨버터, UPS(Uninterruptible Power Supply), 대체 에너지 발전 시스템 등의 적용분야에서 정확하고 빠른 계통 전압의 위상추정은 전체 시스템 제어에 반드시 필요하다. 이 경우 계통 전압의 위상 정보는 기준 전류 신호를 발생하는데 필수적이다. 이 때 계통 전압에 노이즈나 외란이 유입될 경우에도 계통전압의 위상은 순시적으로 정확히 검출되어야 한다.

지금까지 제안된 단상 PLL 방법들로서 [1]의 논문에서는 Inverse Park-Based PLL과 Hibert transformer Based PLL, Transport Delay-Based PLL방법을 제시하였고, [2]의 논문에서는 메모리테이블과 추정위상각과 추정진폭, 2차 필터, 1차 필터, 전역 필터를 사용하여 가상 2상 전압을 만들고 이 두 신호로 arctan을 이용하는 방법과 동기좌표계를 이용하여 위상 제어하는 방법들 중에서 필터방식과 동기좌표계를 이용하는 것이 우수하다고 발표되었다.

본 논문에서는 지금까지 소개된 방법들 중에서 [1]에서 우수하다고 소개한 Inverse Park-Based PLL, Transport Delay-Based PLL과 [2]에서 우수하다고 소개한 필터방식과 동기좌표계를 이용한 PLL들의 구조를 설명하고 dSPACE 1104 시스템과 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 각각의 특성을 비교 분석하고자 한다.

2. 가상 2상 방식의 PLL 구조와 원리

2.1 Inverse Park-Based PLL[1]

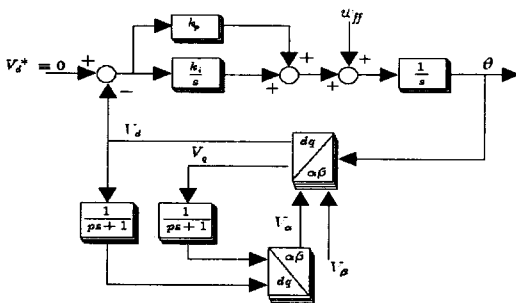


그림 1 Inverse Park-Based PLL

그림 1 은 [1]의 논문에서 소개된 Inverse park-based PLL 구조를 나타낸다. 그림 1에서 보듯이, 입력전압 (V_{β})과 Clark Transformation으로 만들어 낸 신호(V_{α})를 다시 Park Transformation하여 V_d 와 V_q 를 만들어 내고 동기좌표계 위상제어기를 이용한 PLL방식을 사용한다.

2.2 Transport Delay-Based PLL[1]

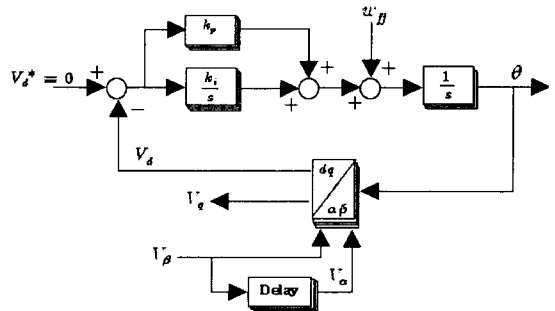


그림 2 Transport Delay-Based PLL

그림 2는 [1]의 논문에서 소개된 Transport Delay-Based PLL의 구조를 나타낸다. 그림 2에서 보듯이, 입력전압(V_{β})으로부터 V_{α} 를 만들어 내기 위해 전달 지연 블록을 사용하고 동기좌표계 위상제어방식을 이용한 PLL 방식을 사용한다. 여기서, 전달 지연은 입력신호의 기본주파수에 대해서 90도의 위상지연을 주기 위해서 사용된다.

2.3 필터방식과 동기좌표계를 사용한 PLL[2]

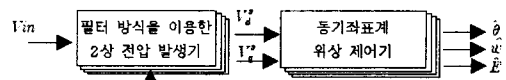


그림 3 필터방식과 동기좌표계를 사용한 PLL

그림 3에서 보듯이 필터방식과 동기 좌표계를 사용한 PLL은 2상 전압 발생기와 위상 제어기로 나눌 수 있다. 2상 전압 발생기로는 1차 저역 통과 필터, 2차 저역 통과 필터, 2차 전역 통과 필터를 사용하고, 위상 제어기는 동기좌표계를 사용하는 방법이 우수하다고 알려져 있다.

2.3.1 필터방식을 이용한 2상 전압 발생기

2상 전압 발생기는 계통 전압을 입력으로 받아 계통 전압과 위상차가 $\pi/2$ 인 신호를 발생하는 부분이다.

(1) 1차 저역 통과 필터(LPF)를 사용하는 방법

그림 4에서와 같이 입력 전압(V_{in})이 차단주파수 ω_c 가 추정각주파수($\hat{\omega}$)인 1차 LPF를 거치면 $\omega \cong \hat{\omega}$ 인

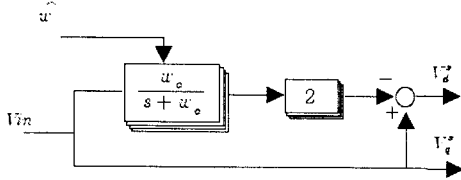


그림 4 1차 저역 통과 필터를 사용하는 방법

$E/\sqrt{2}\sin(\omega_c t - \pi/4)$ 경우가 된다. 그러므로 V_d^s 는

$$\begin{aligned} V_d^s &= V_{in} - 2 \times E/\sqrt{2}\sin(\omega t - \pi/4) \\ &= E\sin(\omega t) - 2 \times E/\sqrt{2}\sin(\omega t - \pi/4) \\ &= E\cos(\omega t) \end{aligned}$$

로 구할 수 있다.

(2) 2차 저역 통과 필터(LPF)를 사용하는 방법

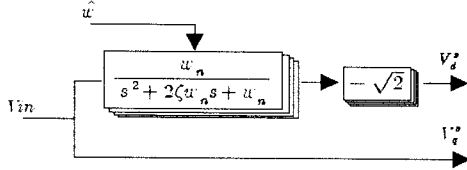


그림 5 2차 저역 통과 필터를 사용하는 방법

그림 5에서와 같이 입력 전압(V_{in})이 감쇄비 $\xi = 1/\sqrt{2}$ 이고, 비감쇄 고유주파수 ω_n 이 추정각주파수($\hat{\omega}$)인 2차 LPF를 거치게 되면 추정각주파수($\hat{\omega}$)가 실제 각주파수와 일치할 경우 입력 전압과 위상차가 $\pi/2$ 이고 크기가 $E/\sqrt{2}$ 인 신호를 얻을 수 있다. 그러므로 V_d^s 는

$$V_d^s \cong (-\sqrt{2})(E/\sqrt{2}\sin(\omega t - \pi/2)) = E\cos(\omega t)$$

로 구할 수 있다.

(3) 2차 전역 통과 필터(APF)를 사용하는 방법

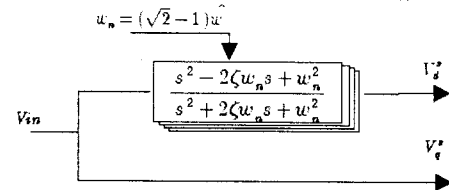


그림 6 2차 전역 통과 필터를 사용하는 방법

그림 6에서와 같이 입력 전압(V_{in})이 감쇄비 $\xi = 1$ 이고

비감쇄 고유주파수 ω_n 이 추정각주파수($\hat{\omega}$)의 $(\sqrt{2}-1)$ 배인 2차 전역 통과 필터를 거치게 되면 추정각주파수($\hat{\omega}$)가 실제 각주파수와 일치할 경우 입력 전압과 위상차가 $\pi/2$ 이고 크기가 E 인 신호를 얻을 수 있다. 그러므로 V_d^s 는

$$V_d^s = \hat{E}\cos\hat{\theta} \cong E\cos\theta$$

로 구할 수 있다.

2.3.2 동기좌표계 위상 제어기

그림 7에서 동기좌표계 위상 제어기는 2상 전압 발생기에서 구한 V_d^s 와 V_q^s 를 이용하여 추정각주파수($\hat{\omega}$), 추정 위상($\hat{\theta}$), 추정진폭(\hat{E})을 발생하는 부분이다.

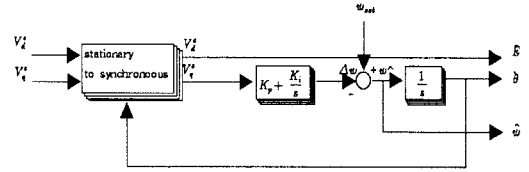


그림 7 동기 좌표계 위상 제어기

그림 7과 같이 V_d^s 와 V_q^s 를 동기 좌표계로 변환하면

$$V_d^s = E\cos(\hat{\theta} - \theta) \cong E \text{ 이 되고,}$$

$$V_q^s = E\sin\theta, V_q^s = E\sin\theta \text{이므로,}$$

$\hat{\theta}$ 와 θ 의 오차가 작은 경우

$$V_d^s = E\cos(\hat{\theta} - \theta) \cong E$$

$$V_q^s = E\sin(\hat{\theta} - \theta) \cong E(\hat{\theta} - \theta)$$

으로 근사화 할 수 있다. 따라서 V_q^s 를 0으로 제어하면 추정 위상각 $\hat{\theta}$ 는 θ 에 일치하게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 8-10의 첫 번째 파형은 실제 전압 입력 V_{in} 과 추정된 \hat{V}_{in} 을 겹쳐서 추정 속도를 비교하였다. 두 번째 파형은 추정된 진폭(\hat{E})을 나타내며 세 번째 파형은 추정된 주파수($\hat{\omega}$)를 나타낸다. 추정된 \hat{V}_{in} 은 추정진폭(\hat{E})과 추정위상($\hat{\theta}$)을 이용하여 $\hat{E}\sin(\hat{\theta})$ 로 만들어 낸다.

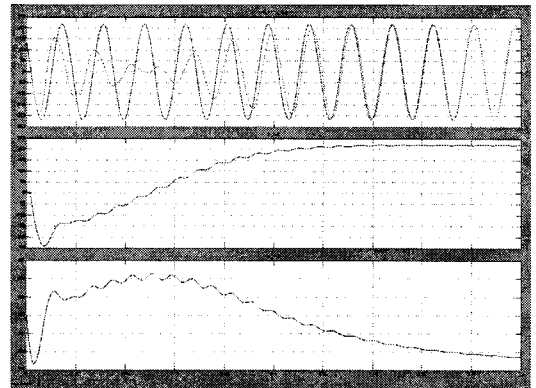


그림 8 Inverse Park-Based PLL

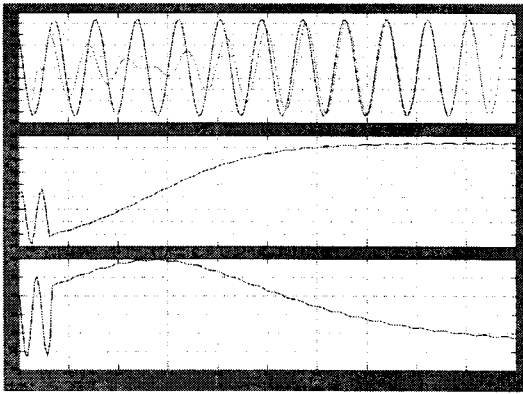


그림 9 Transport Delay-Based PLL

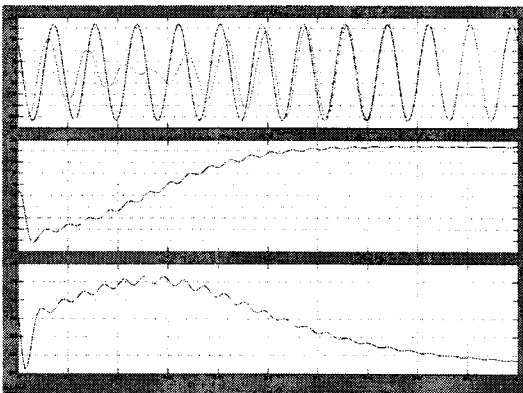


그림 10 2차 필터와 동기좌표계를 이용한 PLL

4. 실험 결과

그림 11-13의 첫 번째 파형은 V_{in} , 두 번째 파형은 \hat{V}_{in} , 세 번째 파형은 추정된 진폭(\hat{A})을 나타내며 네 번째 파형은 추정된 주파수($\hat{\omega}$)를 나타낸다.

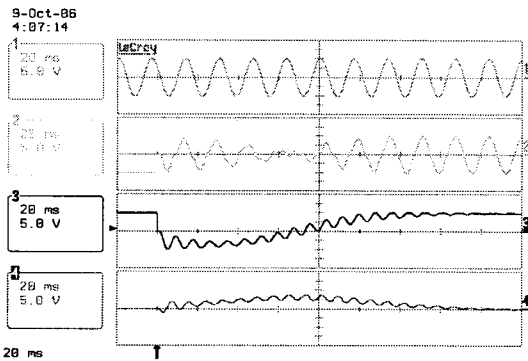


그림 11 Inverse Park-Based PLL

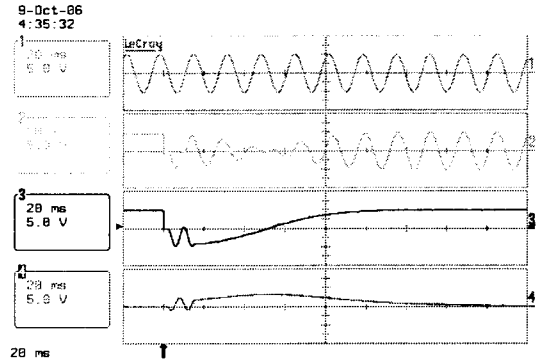


그림 12 Transport Delay-Based PLL

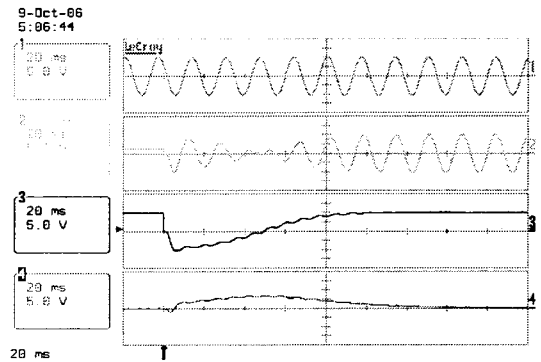


그림 13 2차 필터와 동기좌표계를 이용한 PLL

5. 결 론

본 논문에서는 기존에 소개된 단상 PLL 방식중에서 우수하다고 알려져 있는 5가지의 PLL 구조를 설명하였고, 각 방식의 시뮬레이션 및 dSPACE 1104 시스템과 Matlab/Simulink를 이용한 실험을 통해 비교 검토하였다.

5가지방식 모두 동일한 조건에서 Matlab/Simulink로 시뮬레이션 한 결과 초기 추정특성들이 모두 비슷한 것을 볼 수 있었다. 실험에서도 시뮬레이션에서와 동일한 조건으로 실험한 결과 역시 초기 추정성능이 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 계속해서 전원잡음이 존재시 초기 추정을 검증하고 있는 중이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Silva, S.M., Lopes, B.M., Fiho, B.J.C., Campana, R.P., Borsventura, W.C. "Performance Evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems" Industry Applications Conference. 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE vol.4 pp. 2259-2263
- [2] 김용균, 최중우, 김홍근 "계통 연계형 태양광 발전 시스템의 위상 동기화를 위한 디지털 PLL제어" 대한전기학회논문지, 53권, pp.562-568