

디지털 PLL 제어의 특성 분석

김용균, 최종우, 김홍근
경북대학교

The Analysis of Characteristics for Digital PLL Control

Y.K Kim, J.W. Choi, H.G. Kim
Kyung-Pook National University

ABSTRACT

The frequency and phase angle of the utility voltage are important in many industrial systems. this paper present a detailed analysis of single-phase digital PLL control for utility connected systems. and its performance under utility conditions with noise is discussed. The experimental results demonstrate phase tracking capability in the single-phase grid-connected operation.

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

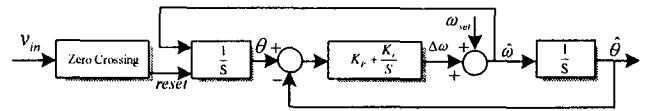


그림 1. 영점 검출 방법

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 벡터각으로부터 위상각을 쉽게 검출할 수 있다. 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 민감한 단점이 있다. 본 논문에서는 가상 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 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.

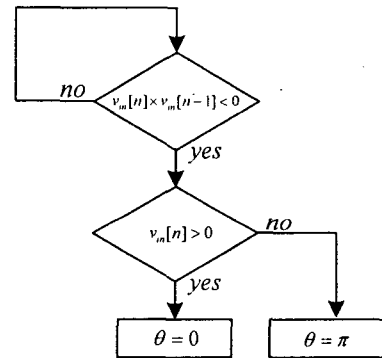


그림 2. 영점 검출 방법의 순서도

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 3은 가상 2상 위상 검출기의 구조이다. 2상 전압 발생기는 입력 전압 v_m 를 통해 위상차가 $\pi/2$ 인 v_1^s 와 v_2^s 를 발생시킨다. 이 두 신호를 위상제어기를 통해 제어

하여 추정위상각($\hat{\theta}$)과 추정주파수($\hat{\omega}$)와 추정진폭(\hat{E})을 출력한다.

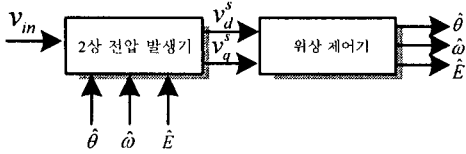


그림 3. 가상 2상 위상 검출기

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^s 와 v_q^s 를 발생한다.

$$v_q^s = E \sin(\omega t) = v_{in} \quad (2)$$

$$v_d^s = E \cos(\omega t) \quad (3)$$

(1) 메모리 테이블을 사용하는 방법^[1]

그림 4에서와 같이 v_{in} 을 매주기마다 메모리에 저장한다. 이때 v_q^s 는 v_{in} 과 같고 v_d^s 는 v_{in} 의 1/4주기 이전의 값에 (-1)를 곱하고 $\omega \cong \hat{\omega}$ 이면

$$v_d^s = -v_{in}(t - \frac{\pi}{2\hat{\omega}}) = -E \sin(\omega t - \frac{\omega \pi}{2\hat{\omega}}) \cong E \cos(\omega t) \quad (4)$$

이 되어 $E \cong \hat{E}$ 이고 $\theta \cong \hat{\theta}$ 이면 v_d^s 는 v_q^s 와 90° 위상차가 나는 신호가 된다.

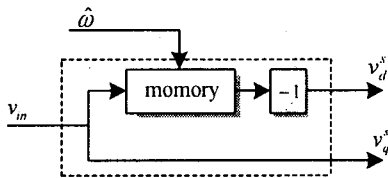


그림 4. 테이블을 사용하는 방법

(2) 추정위상과 추정진폭을 이용하는 방법

그림 5에서와 같이 추정된 \hat{E} 와 $\hat{\theta}$ 에 cosine을 곱하면

$$v_d^s = \hat{E} \cos \hat{\theta} \cong E \cos \theta \quad (5)$$

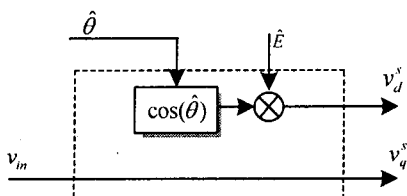


그림 5. 추정위상과 진폭을 이용하는 방법

(3) 2차 필터를 이용하는 방법

그림 6에서와 같이 2차 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 v_d^s 와 v_q^s 를 발생한다.

입력 전압(v_{in})이 감쇄비 $\zeta = 1/\sqrt{2}$ 이고 비감쇄 고주파수 ω_n 이 추정각주파수($\hat{\omega}$)인 2차 LPF를 거치게 되면 추정각주파수($\hat{\omega}$)가 실제각주파수와 일치할 경우 입력 전압과 위상차가 $\pi/2$ 이고 크기가 $E/\sqrt{2}$ 인 신호를 얻을 수 있다. 그러므로 v_d^s 는

$$v_d^s \cong (-\sqrt{2}) \left(\frac{E}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \right) = E \cos(\omega t) \quad (6)$$

로 구할 수 있다.

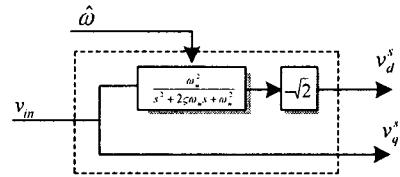


그림 6. 2차 LPF를 사용하는 방법

(4) 1차 필터를 사용하는 방법

그림 7에서와 같이 1차 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 v_d^s 와 v_q^s 를 발생한다.

입력 전압(v_{in})이 차단주파수 ω_c 가 추정각주파수($\hat{\omega}$)인 1차 LPF를 거치면 $\omega \cong \hat{\omega}$ 인 경우 $(E/\sqrt{2})\sin(\omega_c t - \pi/4)$ 가 된다.

그러므로 v_d^s 는

$$\begin{aligned} v_d^s &= v_{in} - 2 \times \frac{E}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \\ &= E \sin(\omega t) - 2 \times \frac{E}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \\ &= E \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

로 구할 수 있다.

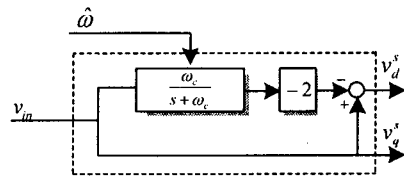


그림 7. 1차 LPF를 사용하는 방법

2.2.2 위상 제어기

그림 3에서 위상 제어기는 2.2.1에서 구한 v_d^s 와 v_q^s 를

이용하여 추정각주파수($\hat{\omega}$), 추정위상($\hat{\theta}$), 추정진폭(\hat{E})를 발생하는 부분이다.

- (1) arctan을 사용하는 방법
그림 7에서와 같이

$$\theta^* = \tan^{-1}\left(\frac{v_q^s}{v_d^s}\right) \quad (8)$$

을 얻을 수 있다.

지령위상각(θ^*)과 추정위상각($\hat{\theta}$)의 차를 PI 제어하여 $\Delta\omega$ 를 만들어 내어 각주파수 설정치(ω_{set})를 더하여 추정주파수($\hat{\omega}$)를 발생시킨다. 추정주파수($\hat{\omega}$)를 적분하면 추정위상각($\hat{\theta}$)을 얻을 수 있다. 추정진폭(\hat{E})은 다음식에 의해 구한다.

$$\hat{E} = \sqrt{(v_d^s)^2 + (v_q^s)^2} \quad (9)$$

입력 전원에 노이즈가 많을 경우 LPF(Low Pass Filter)를 삽입하여 노이즈에 대한 영향을 줄일 수 있다.

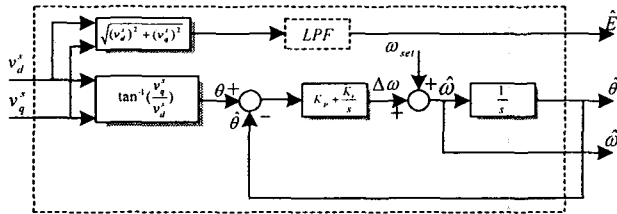


그림 7. arctan을 이용하는 방법

- (2) 동기 좌표계를 사용하는 방법

그림 8과 같이 v_d^s , v_q^s 를 동기 좌표계로 변환하면

$$v_d^e = v_d^s \cos \hat{\theta} + v_q^s \sin \hat{\theta} \quad (10)$$

$$v_q^e = -v_d^s \sin \hat{\theta} + v_q^s \cos \hat{\theta} \quad (11)$$

이 되고, $v_d^s = E \cos \theta$, $v_q^s = E \sin \theta$ 이므로, $\hat{\theta}$ 와 θ 의 오차가 작은 경우

$$v_d^e = E \cos(\hat{\theta} - \theta) \cong E \quad (12)$$

$$v_q^e = E \sin(\theta - \hat{\theta}) \cong E(\theta - \hat{\theta}) \quad (13)$$

으로 근사화 할 수 있다. 즉, v_d^e 는 입력 전원의 진폭을 나타내고, v_q^e 는 추정 위상오차를 표현한다.

v_q^e 에 추정진폭(\hat{E})을 나누어 추정오차를 구한 다음 PI

제어하여 $\Delta\omega$ 를 출력하고 주파수 설정치(ω_{set})를 더하여 추정주파수($\hat{\omega}$)를 발생한다. 추정주파수($\hat{\omega}$)를 적분하여 추정위상각($\hat{\theta}$)을 얻는다. v_d^e 는 입력 전원의 진폭을 나타내므로 추정 진폭이 되고 입력 전원에 노이즈가 많을 경우 노이즈를 차단하기 위해 LPF(Low Pass Filter)를 삽입할 수 있다.

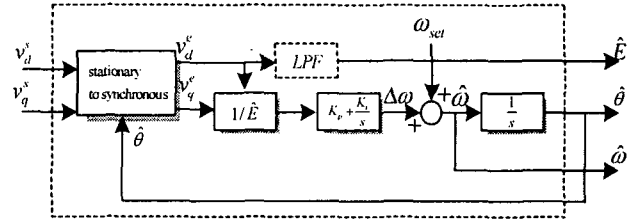


그림 8. 동기 좌표계를 이용하는 방법

2.2.3 실제적 구현

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.

$$K = \frac{1}{|F(j\hat{\omega})|} \quad (14)$$

$$\theta_{com} = \angle F(j\hat{\omega}) \quad (15)$$

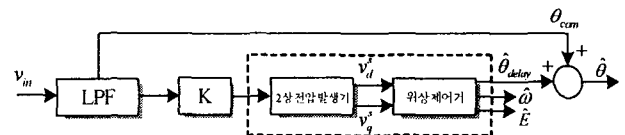


그림 9. 전체 블록도

3. 실험

앞에서 설명한 2상 전압 발생기와 위상 제어기를 조합하면 다음과 같은 표 1의 8가지의 PLL 제어방식을 구성할 수 있다.

다음과 같은 조건에서 8가지 방법에 대한 초기 추정특성과 정상상태 추정특성, 그리고 전압 강하시 추정특성을 실험하였다. 입력 전원은 220Vrms, 60Hz이며, 노이즈에 대한 강인성을 검증하기 위해 노이즈(30Vpeak, 1kHz)를 주입하였고 추정기는 실제 위상이 π 일 때부터 동작시켰다.

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

$$\hat{v}_m = \hat{E} \sin \hat{\theta} \quad (16)$$

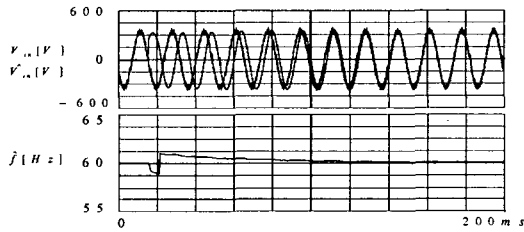
표 1. PLL 제어방식

	2상 전압 발생기	위상 제어기
방식 I	메모리데이블을 사용하는 방법	arctan을 사용하는 방법
방식 II	추정위상각과 추정진폭을 사용하는 방법	arctan을 사용하는 방법
방식 III	2차 필터를 사용하는 방법	arctan을 사용하는 방법
방식 IV	1차 필터를 사용하는 방법	arctan을 사용하는 방법
방식 V	메모리데이블을 사용하는 방법	동기좌표계를 사용하는 방법
방식 VI	추정위상각과 추정진폭을 사용하는 방법	동기좌표계를 사용하는 방법
방식 VII	2차 필터를 사용하는 방법	동기좌표계를 사용하는 방법
방식 VIII	1차 필터를 사용하는 방법	동기좌표계를 사용하는 방법

3.1 초기 추정 특성

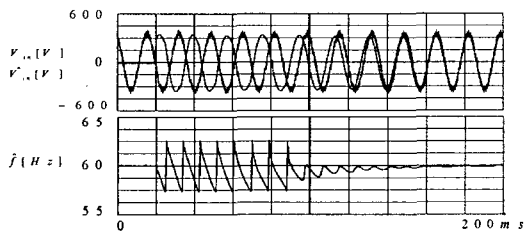
그림 10은 초기 추정 특성을 나타내고 있다.

초기위상이 π 일때 제어가 동작하여 대략적으로 100ms에서 160ms사이에 크기, 위상, 주파수를 추정하며 노이즈에도 강인하다. 방식 II와 VI의 경우 추정 시간이 약 160ms로 느린 특성을 보이고 나머지는 약 120ms로 우수한 특성을 보인다.



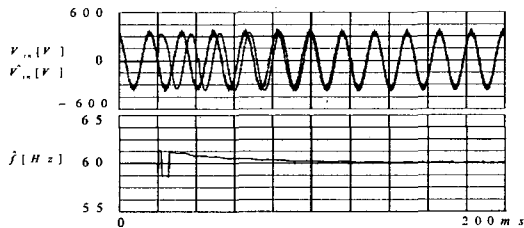
(a) 방식 I (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



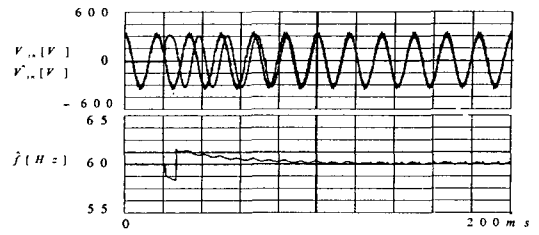
(b) 방식 II (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



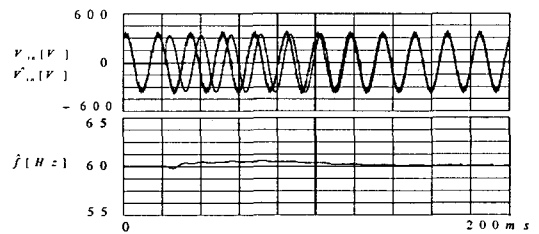
(c) 방식 III (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



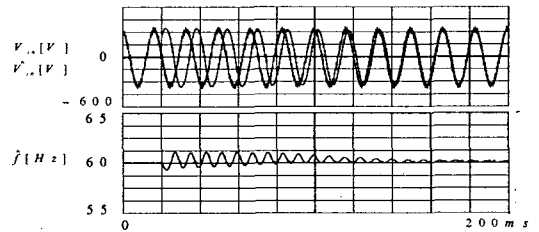
(d) 방식 IV (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



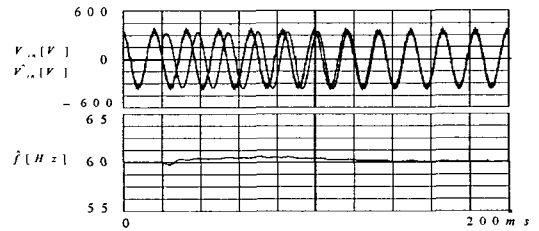
(e) 방식 V (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



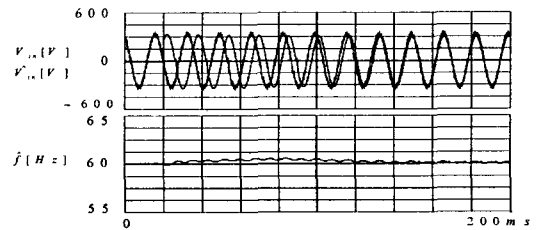
(f) 방식 VI (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



(g) 방식 VII (상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))



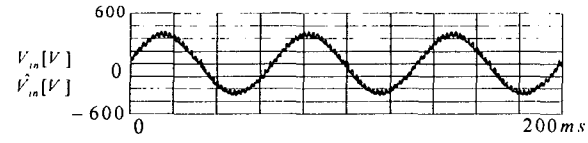
(h) 방식 VIII

(상단: 입력전원 (v_{in}) 과 추정 입력전원 (\hat{v}_{in}))

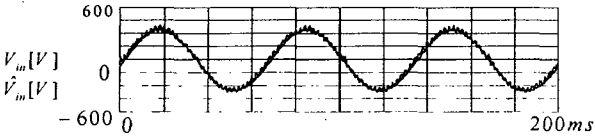
(하단: 추정 입력주파수 (\hat{f}))

그림 10. 초기 추정 특성

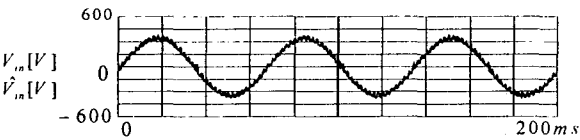
3.2 정상상태 추정 특성



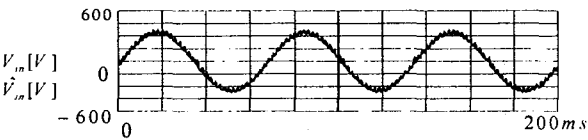
(a) 방식 I (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



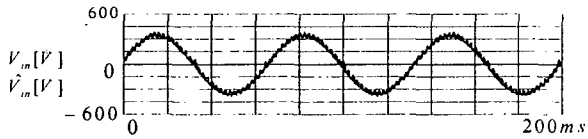
(b) 방식 II (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



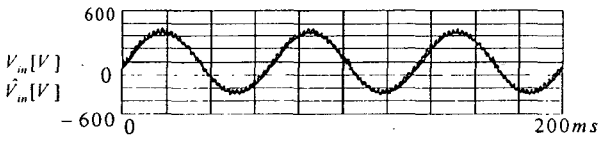
(c) 방식 III (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



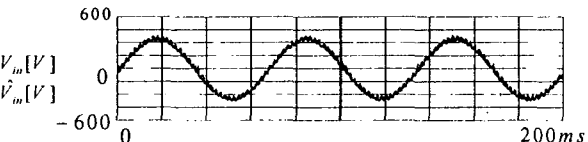
(d) 방식 IV (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



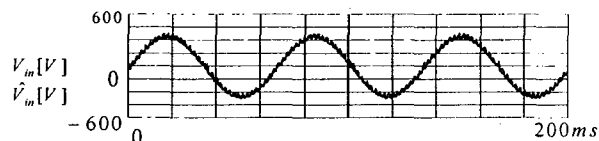
(e) 방식 V (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



(f) 방식 VI (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))



(g) 방식 VII (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

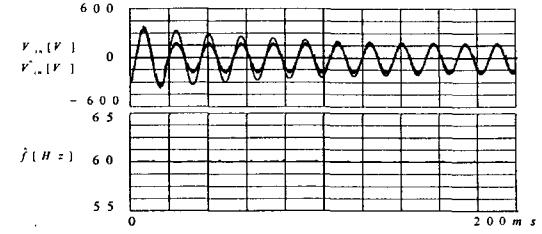


(h) 방식 VIII (입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

그림 11. 정상상태 추정 특성

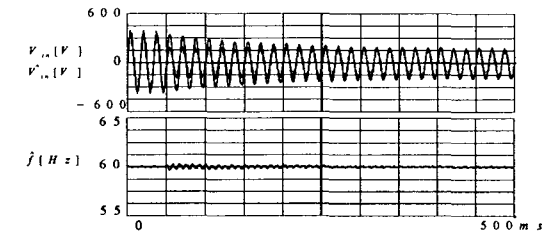
그림 11은 정상 상태 추정 특성을 나타낸다. 노이즈가 있는 상황에서도 추정 입력 전원이 실제 입력 전원을 잘 추정하며 주파수도 60Hz로 추정한다.

3.3 전압 강하시 추정 특성



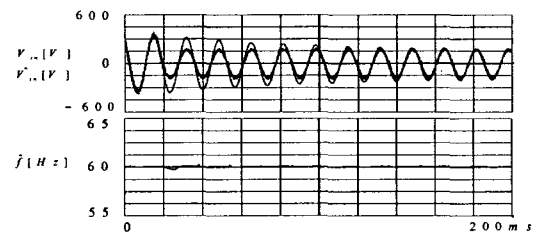
(a) 방식 I (상단: 입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

(하단: 추정입력주파수(\hat{f}))



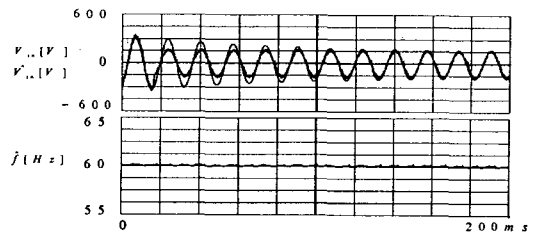
(b) 방식 II (상단: 입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

(하단: 추정입력주파수(\hat{f}))



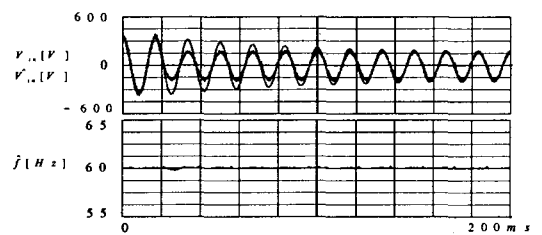
(c) 방식 III (상단: 입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

(하단: 추정입력주파수(\hat{f}))



(d) 방식 IV (상단: 입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

(하단: 추정입력주파수(\hat{f}))

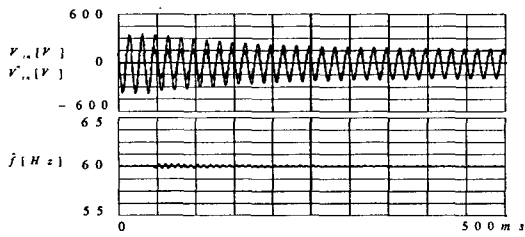


(e) 방식 V (상단: 입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))

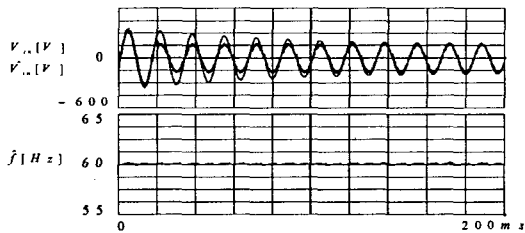
(하단: 추정입력주파수(\hat{f}))

참 고 문 헌

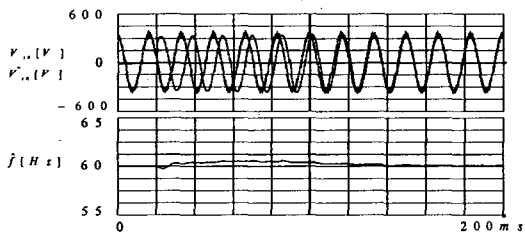
- [1] SaKamoto S., Izumi T., Yokoyama T., Haneyoshi T., "A new method for digital PLL control using estimated quadrature two phase frequency detection." in PCC Osaka 2002 proceedings, Vol. 2, pp. 671-676.
- [2] Guan-Chyu Hsieh, Hung, J.C, "Phase-locked loop techniques loop techniques.A survey", IEEE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



(f) 방식 VI (상단:입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))
(하단:추정입력주파수(\hat{f}))



(g) 방식 VII (상단:입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))
(하단:추정입력주파수(\hat{f}))



(h) 방식 VIII
(상단:입력전원(v_{in})과추정입력전원(\hat{v}_{in}))
(하단:추정입력주파수(\hat{f}))

그림 12. 전압 강하시 추정 특성

그림 12는 입력 전원의 전압이 50% 강하되었을 때 추정 특성을 보이고 있다. 방식 II와 VI의 경우 약 250ms에서 추정하며 나머지 방식은 약 120ms에서 추정한다.

4. 결 론

가상 2상 위상 검출기의 8가지 PLL 제어방식의 주파수 및 위상 검출의 일반적인 원리와 구현 방식을 제시하였고 실험을 통해 노이즈에 대한 강인성과 추정 특성을 검증하였다. 실험 결과를 통해 메모리테이블을 사용하는 방법과 필터를 사용하는 방법이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 그런데 메모리테이블을 사용하는 방법은 메모리의 저장 공간이 많이 필요하며 구현이 어려운 단점이 있다. 따라서 특성이 우수하며 구현이 용이한 필터를 사용하는 방법이 바람직하다.