

상태관측기를 이용한 단상 PLL제어의 성능 개선

黃熙勳^{*}, 崔鐘宇[†]

Performance Improvement of Single-phase PLL Control using State Observer

Hee-Hun Hwang and Jong-Woo Choi

요약

본 논문에서는 단상 전원의 위상 및 주파수 검출을 위해 전차원 상태관측기를 이용한 가상 2상 방식의 단상 위상고정루프(PLL: Phase Locked Loop) 제어기를 제안한다. 기존의 방식은 전원단에 주입된 저차 고조파를 완벽하게 제거하지 못하여 전체 PLL 시스템에 영향을 주게 된다. 제안된 알고리즘은 전차원 상태관측기를 사용하여 기본파와 고조파를 분리하고 고조파 성분을 효과적으로 제거 및 검출하여 기본파 성분만을 발생한다. 그리고 가상 발생신호 및 기존 입력신호를 함께 제어함으로써 기존방식보다 정상상태 오차를 감소시킬 수 있다. 모의실험결과 및 실제 실험결과를 통하여 설계한 제어기에 의해 발생된 주파수가 실제값에 수렴하였으며 정상상태 추정 특성이 향상됨을 검증하였다. 또한 고조파 성분이 효과적으로 제거되고 기본파 성분만을 출력하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a single-phase Phase-locked loop (PLL) of the virtual two phase generator using full-order state observer, which is essential to find phase and frequency of the single-phase source. The conventional methods cannot remove the low-order harmonics included in source voltage, which influence to whole PLL control system. The proposed algorithm separates fundamental wave from harmonics, and removes harmonics effectively. Therefore it generates only the fundamental wave. As it controls virtual voltage and input voltage together, it decreases steady-state error. From simulation and experimental results, the generated frequency by the proposed PLL which it plans, converges to the actual value, and the steady-state error is much reduced under given harmonic voltages. It is also confirmed that the proposed algorithm removed harmonics effectively and it generates only the fundamental wave.

Key Words : PLL, Observer, Power Quality, Harmonics

1. 서론

PLL 시스템은 전력품질 보상기, 무정전 전원장치

(UPS: Uninterruptible Power Supply), 고조파 저감장치 등의 전력품질제어분야에서 전원의 정확하고 빠른 위상 검출을 위해 사용되고 있다. 3상 제어의 경우 좌표 변환으로부터 위상각을 쉽게 검출할 수 있다.^[1] 그러나 단상의 경우에는 이러한 방법이 적용되지 않으므로 어렵다.

단상 위상 검출 방식은 단상 검출 방식과 가상 2상 검출 방식으로 나눌 수 있다. 단상 검출 방식의 영점

[†]교신저자 : 정희원, 경북대 전자전기컴퓨터학부 부교수

E-mail : jwchoi@ee.knu.ac.kr

^{*}학생회원 : 경북대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2008. 6. 16 1차 심사 : 2008. 8. 21

2차 심사 : 2008. 10. 20 3차 심사 : 2008. 11. 27

심사완료 : 2008. 12. 7

검출 방식^{[2],[3]}은 영전압 교차점을 아날로그 회로를 이용하여 찾아내고 PLL 제어를 통하여 위상각을 검출한다. 그러나 영점에서만 위상을 검출하기 때문에 추정 속도가 느리며 순시적인 위상을 검출할 수 없고 노이즈에 민감한 단점이 있다. 가상 2상 제어는 입력전압에 90도의 위상차를 가지는 가상의 전압을 설정하고 입력전압 및 가상전압의 벡터를 조합하여 PLL 제어를 통해 위상각을 검출한다.^[2]

기존의 방식으로는 추정진폭과 추정위상을 이용하는 방법, 1차 저역통과필터를 이용하는 방법, 2차 저역통과필터를 이용하는 방법 등이 있다.^[2] 기존의 방식의 문제점은 가상 2상 전압을 만들어 내는 과정에서 입력전압은 어떠한 필터링 과정도 거치지 않기 때문에 고조파가 주입될 경우 이를 제거할 수 있는 방법이 없다는 것이다. 따라서 고조파가 포함된 가상 2상 전압이 발생되며 이것을 위상제어하기 때문에 정상상태에서 많은 오차가 존재한다.

본 논문에서는 전차원 상태관측기를 이용한 가상 2상 제어방식의 단상 PLL을 제안한다. 전차원 상태관측기를 이용하여 입력전압에 포함된 고조파를 분리하여 검출하였고, 이를 제거하고 기본파 성분만을 출력하여 위상제어 함으로써 고조파의 영향을 최소화하였다. 그리고 입력전압 및 가상전압을 동시제어함으로써 정상상태 특성을 개선시켰다. 전차원 상태관측기를 이용한 가상 2상 발생기의 원리와 구현방식을 살펴보고 이를 기존방식과 비교·분석하고 MATLAB Simulink를 이용한 모의실험과 실제실험을 통하여 성능이 향상됨을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 가상 2상 위상 검출 방식의 구조와 원리

그림 1은 가상 2상 위상 검출방식의 단상 PLL의 구조이다. 2상 전압 발생기는 입력전압(v_{in})을 v_q^s 전압으로 설정하고 v_q^s 전압과 $\pi/2$ 의 위상차를 가지는 v_d^s 전압을 발생한다.^{[2],[4]} 위상 제어기는 v_d^s, v_q^s 전압을 이용하여 추정진폭(\hat{E}), 추정주파수($\hat{\omega}$)와 추정위상($\hat{\theta}$)을 발생한다. 현재 이용되고 있는 가상 2상 제어 방식은 추정진폭과 추정위상을 이용하는 방법, 전역통과필터를 이용하는 방법, 2차 저역통과필터를 이용하는 방법 등이 있다.^[1]

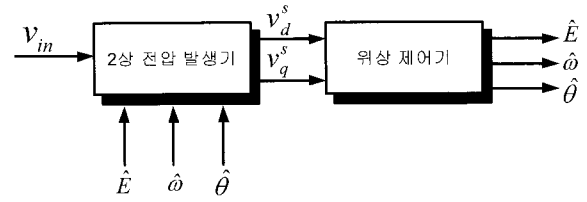


그림 1 가상 2상 위상 검출방식의 단상 PLL
Fig. 1 Single-phase PLL of virtual two phase detection method

2.2 2상 전압 발생기

2상 전압 발생기의 입력전압(v_{in})은 다음 식(1)과 같다.

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

식 (1)을 토대로 입력전압(v_{in})을 v_q^s 전압으로 모델링하고 v_q^s 전압과 $\pi/2$ 의 위상차를 가지는 v_d^s 전압을 모델링한다.^{[2],[4]}

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

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

2.2.1 전역통과필터를 이용하는 방법^[2]

그림 2에서와 같이 전역통과필터(All Pass Filter)를 사용하여 v_d^s, v_q^s 전압을 발생한다.

입력전압(v_{in})이 추정주파수($\hat{\omega}$)와 동일한 차단주파수(ω_c)를 가지는 전역통과필터를 거치면 $\omega \cong \hat{\omega}$ 인 경우 다음과 같은 v_d^s 전압이 발생한다.

$$v_d^s(s) = \frac{s - \omega}{s + \omega} v_{in}(s) = (1 - 2 \frac{\omega}{s + \omega}) v_{in}(s) \quad (4)$$

$$v_d^s(t) = E \sin(\omega t) - 2 \times \frac{E}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) = E \cos(\omega t) \quad (5)$$

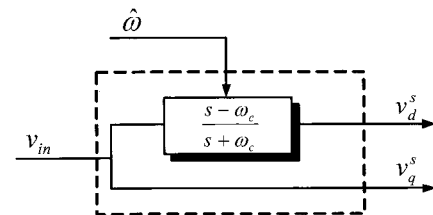


그림 2 전역통과필터를 이용하는 가상2상 검출
Fig. 2 Virtual two-phase detection using all pass filter

2.2.2 2차 저역통과필터를 이용하는 방법^[2]

그림 3에서와 같이 2차 저역통과필터(LPF: Low Pass Filter)를 사용하여 v_d^s, v_q^s 전압을 발생한다.

입력전압(v_{in}) 이 감쇄비 $\zeta = 1/\sqrt{2}$, 비감쇄 고유주파수 $\omega_n \cong \hat{\omega}$ 인 2차 저역통과필터를 거치면 $\omega \cong \hat{\omega}$ 인 경우 위상차가 $\pi/2$ 이고 크기가 $E/\sqrt{2}$ 인 신호를 얻을 수 있다. 따라서 다음과 같은 v_d^s 전압이 발생한다.

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

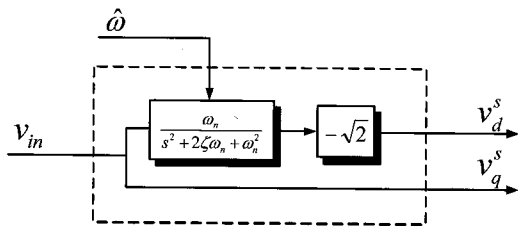


그림 3 2차 저역통과필터를 이용하는 가상 2상 검출
Fig. 3 Virtual two-phase detection using second low pass filter

2.2.3 전차원 상태관측기를 이용하는 방법

2상 전압(v_d^s, v_q^s)에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{dv_q^s}{dt} = \omega E \cos(\omega t) = \omega v_d^s \quad (7)$$

$$\frac{dv_d^s}{dt} = -\omega E \sin(\omega t) = -\omega v_q^s \quad (8)$$

식 (7)~(8)를 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같고,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \end{bmatrix} \quad (9)$$

상태관측기 이론^[5]을 토대로 다음과 같은 상태관측기를 구성할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\omega} \\ -\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} [y - [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \end{bmatrix}] ,$$

$$y = v_{in} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \end{bmatrix} \quad (10)$$

관측기의 특성방정식은 다음과 같고,

$$\det[sI - (A - LC)] = 0 \quad (11)$$

$$s^2 + l_1 s + \hat{\omega}(\hat{\omega} + l_2) = 0 \quad (12)$$

특성방정식의 극위치를 α_1, α_2 라고 하면,

$$s^2 - (\alpha_1 + \alpha_2)s + \alpha_1\alpha_2 = 0 \quad (13)$$

식 (11)~(13)에서 특성방정식을 만족하기 위한 비레이득 행렬 L 은 다음과 같고,

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\alpha_1 + \alpha_2) \\ \frac{\alpha_1\alpha_2}{\hat{\omega}} - \hat{\omega} \end{bmatrix} \quad (14)$$

중근일 경우($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$) 비레이득 행렬 L 은 다음과 같다.

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha \\ \frac{\alpha^2}{\hat{\omega}} - \hat{\omega} \end{bmatrix} \quad (15)$$

그림 4는 전차원 상태관측기를 사용하여 v_d^s, v_q^s 전압을 발생시키는 방법을 나타낸다.

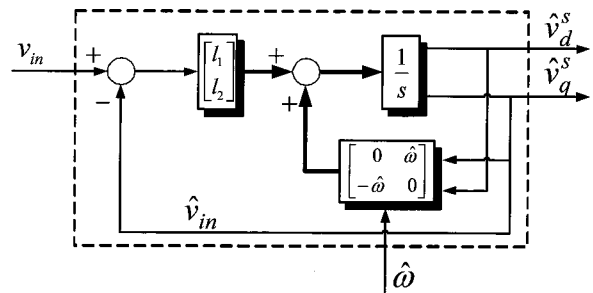


그림 4 전차원 상태관측기를 이용하는 가상 2상 검출
Fig. 4 Virtual two-phase detection using full-order state observer

2.2.4 전차원 상태관측기를 이용한 가상 2상 발생기의 고조파 검출방법

입력전압(v_{in})에는 기본파 이외에도 기본파의 정수배 주파수를 가지는 고조파 전압(v_n)이 유입된다.^{[4],[8]} n차 고조파 성분의 관계식을 다음과 같이 모델링할 수 있다.

우선 n차 고조파를 다음과 같이 모델링하고,

$$v_n = E_n \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{16}$$

식 (16)로부터 입력전압(v_{in})에 포함된 고조파 전압(v_{qn})과 $\pi/2$ 의 위상차를 가지는 (v_{dn}) 전압을 다음과 같이 정의한다.

$$v_{qn} = E_n \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{17}$$

$$v_{dn} = E_n \cos(n\omega t + \theta_n) \tag{18}$$

식 (17)~(18)를 토대로 다음 관계식을 구성할 수 있으며,

$$\frac{dv_{qn}}{dt} = n\omega E_n \cos(n\omega t + \theta_n) = n\omega v_{dn} \tag{19}$$

$$\frac{dv_{dn}}{dt} = -n\omega E_n \sin(n\omega t + \theta_n) = -n\omega v_{qn} \tag{20}$$

상태방정식으로 구성하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{qn} \\ v_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n\omega \\ -n\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qn} \\ v_{dn} \end{bmatrix} \tag{21}$$

입력전압(v_{in}) 및 고조파 전압(v_n)에 의한 식(9), 식 (21)로부터 다음과 같은 관측기의 상태 방정식을 구할 수 있다.^[5]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn} \\ \hat{v}_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\omega} & 0 & 0 \\ -\hat{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n\hat{\omega} \\ 0 & 0 & -n\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn} \\ \hat{v}_{dn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} [y - [1 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{v}_q^s \\ \hat{v}_d^s \\ \hat{v}_{qn} \\ \hat{v}_{dn} \end{bmatrix}], \quad y = v_{in} + v_n = [1 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \\ v_{qn} \\ v_{dn} \end{bmatrix} \tag{22}$$

식 (22)의 특성방정식은 다음과 같고,

$$\det[sI - (A - LC)] = 0 \tag{23}$$

$$4s^4 + 4(l_1 + l_3)s^3 + 6l_1l_3s^2 + \{l_1(n\hat{\omega})^2 + l_1n\hat{\omega} - 2\hat{\omega}l_2l_3\}s + \hat{\omega}l_2l_4(2n\hat{\omega} - 1) + (-3n\hat{\omega}^2 + \hat{\omega})(\hat{\omega} + l_2)(n\hat{\omega} + l_4) = 0 \tag{24}$$

특성방정식의 극위치를 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 라고 하면,

$$s^4 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)s^3 + (\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_2\alpha_4 + \alpha_3\alpha_4)s^2 - (\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + \alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3\alpha_4)s + \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4 = 0 \tag{25}$$

4중근($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$) 일 경우 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^4 - 4\alpha s^3 + 6\alpha^2 s^2 - 4\alpha^3 s + \alpha^4 = 0 \tag{26}$$

식 (23)~(26)에서 4중근일 경우 특성방정식을 만족하기 위한 비레이득 행렬 L 은 다음과 같다.

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha \\ \frac{2\alpha^2}{\hat{\omega}} - \frac{n^2\hat{\omega}}{2} \\ -2\alpha \\ \sqrt{\frac{8\alpha^4}{n\hat{\omega}^2} + 2\hat{\omega}^2(1-3n)} \end{bmatrix} \tag{27}$$

그림 5에서는 전차원 상태관측기를 사용하여 기본파 가상 2상 전압(v_d^s, v_q^s)과 고조파 가상 2상 전압($\hat{v}_{dn}^s, \hat{v}_{qn}^s$)을 검출하고 실제 위상제어기에 사용되는 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압을 발생한다.

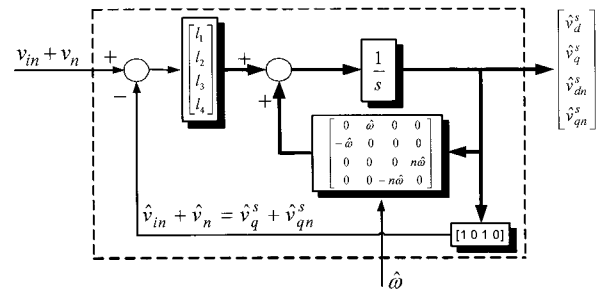


그림 5 고조파가 포함된 경우 가상 2상 검출
 Fig. 5 Virtual two-phase detection with harmonics

2.3 위상 제어기

위상 제어기는 가상 2상 발생기의 출력인 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압을 입력으로 받아 추정진폭(\hat{E}), 추정주파수($\hat{\omega}$)와 추정위상($\hat{\theta}$)을 발생한다. 위상 제어기는 arctan 함수를 사용하는 방법, 동기좌표계를 사용하는 방법으로 나뉜다.^{[2],[7]}

2.3.1 Arctan을 사용하는 방법^[2]

그림 6에서와 같이 arctan 함수를 사용하여 위상제어기의 지령위상(θ^*)을 얻을 수 있다.

$$\theta^* = \tan^{-1}\left(\frac{v_q^s}{v_d^s}\right) \quad (28)$$

지령위상(θ^*)과 추정위상($\hat{\theta}$)의 오차인 위상오차($\Delta\theta$)를 PI 제어하여 주파수오차($\Delta\omega$)를 만들고 주파수설정치(ω_{ref})를 더하여 추정주파수($\hat{\omega}$)를 발생한다. 추정주파수($\hat{\omega}$)를 적분하면 추정위상($\hat{\theta}$)을 얻을 수 있으며 추정진폭(\hat{E})은 다음 식에 의해 구한다.

$$\hat{E} = \sqrt{(v_d^s)^2 + (v_q^s)^2} \quad (29)$$

입력전원에 노이즈가 많을 경우 저역통과필터를 삽입하여 노이즈에 대한 영향을 줄일 수 있다.

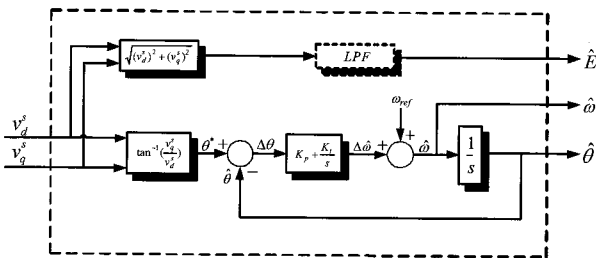


그림 6 Arctan 함수를 사용하는 위상제어기
Fig. 6 Phase controller using arctangent function

2.3.2 동기좌표계를 사용하는 방법^[2]

그림 7에서와 같이 v_d^s, v_q^s 전압을 동기좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$v_d^e = v_d^s \cos \hat{\theta} + v_q^s \sin \hat{\theta} \quad (30)$$

$$v_q^e = -v_d^s \sin \hat{\theta} + v_q^s \cos \hat{\theta} \quad (31)$$

위의 식(30)~(31)에서 $v_d^s = E \cos(\omega t) = E \cos(\theta)$, $v_q^s = E \sin(\omega t) = E \sin(\theta)$ 이고, 실제위상(θ)과 추정위상($\hat{\theta}$)의 오차가 작은 경우 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$v_d^e = E \cos(\hat{\theta} - \theta) \cong E \quad (32)$$

$$v_q^e = E \sin(\theta - \hat{\theta}) \cong E(\theta - \hat{\theta}) \quad (33)$$

v_q^e 전압에 추정진폭(\hat{E})을 나누어 위상오차($\Delta\theta$)를 구하고 이를 PI 제어하여 주파수오차($\Delta\omega$)를 만들고 주파수설정치(ω_{ref})를 더하여 추정주파수($\hat{\omega}$)를 발생한다. 추정주파수($\hat{\omega}$)를 적분하면 추정위상($\hat{\theta}$)을 얻을 수 있으며 v_d^e 전압은 입력 전원의 진폭을 나타내므로 추정진폭(\hat{E})을 얻을 수 있다.

입력전원에 노이즈가 많을 경우 저역통과필터를 삽입하여 노이즈에 대한 영향을 줄일 수 있다.

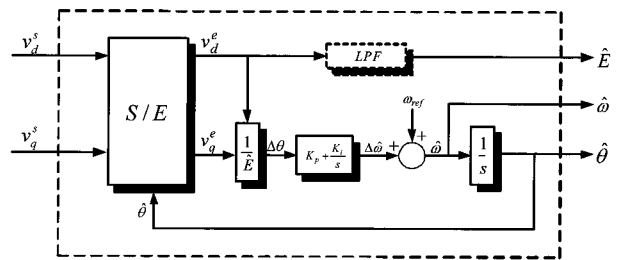


그림 7 동기좌표계를 사용하는 위상제어기
Fig. 7 Phase controller using synchronous frame

2.4 모의실험 및 실제실험 결과

지금까지 제시한 2상 전압 발생기와 위상 제어기를 조합하여 다음 모의실험을 수행하였다. 입력전원은 220V, 60Hz이며 랜덤노이즈(Random noise, 최대오차 10%)를 주입하여 강인성을 검증하였으며, 위상 제어기는 Arctan방식을 사용하였으며 기존방식 및 제안한 방식 모두 동일한 위상제어기를 사용하였다. 고조파 검

출 실험 시에는 5,7,9,11차 고조파를 주입하였다. 제어기는 입력전원의 반주기에서 동작하도록 시뮬레이션하여 초기 위상각 오차가 최대가 되는 180도 지점에서 제어를 시작하였으며 추정주파수는 50~70Hz로 제한하여 실험하였다. 또한 기존방식과의 비교 및 분석시 적절한 비교대상이 되는 방식을 선정하여 제안한 방식과 함께 실험하였다.

표 1 모의실험 및 실제실험 조건

Table 1 Parameter of simulations and experiments

입력 전원	220V, 60Hz
랜덤노이즈	최대오차10%
위상제어기방식	Arctan
위상제어기 Bandwidth	300rad/s
주입 고조파 (기본과 대비 고조파 비율)	5차(20%), 7차(14%), 9차(11%), 11차(9%)
제어기 동작 시점	0.0083s (1/2주기 지점)
추정주파수 제한	50~70Hz
DSP Board	TMS320C32

2.4.1 랜덤 노이즈 주입 실험결과

그림 8은 2상 전압 발생기의 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압을 나타내고 있다. 초기 위상오차가 180도가 되는 지점에서 동작하여 기존방식 및 제안한 방식 모두 0.02초 부근에서 정상상태로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

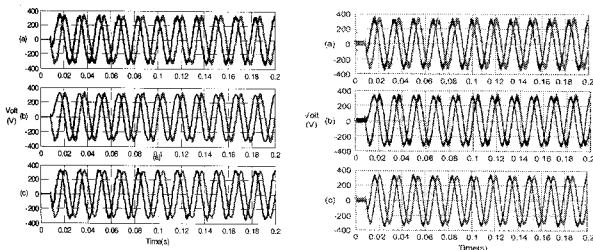


그림 8 2상 전압 발생기의 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압 (좌: 모의실험, 우: 실제실험)

(a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법

Fig. 8 v_d^s, v_q^s voltage of two phase generator (Left: simulation, Right: experiment)

(a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer

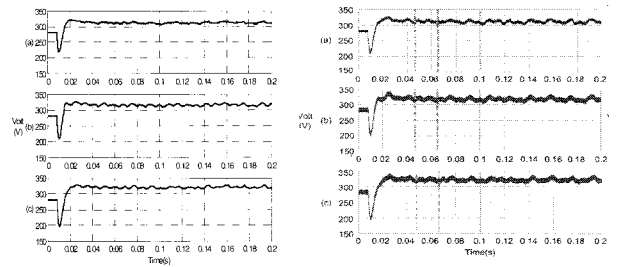


그림 9 진폭 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험) (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법

Fig. 9 Amplitude estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment) (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer

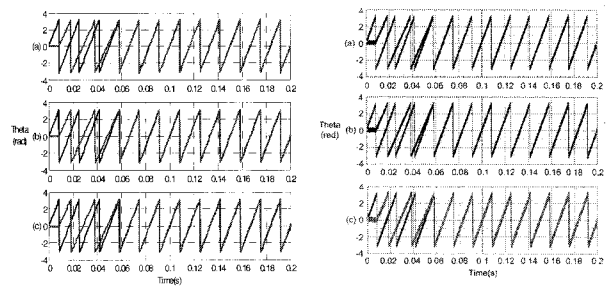


그림 10 위상 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험) (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법

Fig. 10 Phase estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment) (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer

그림 9는 진폭 전압을 나타내고 있다. 2상 전압 발생기에서 발생된 가상 2상 전압을 토대로 발생된 진폭에서 랜덤노이즈의 영향으로 인해 리플이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 제안한 방식은 기존의 방식과 비슷한 성능을 나타내고 있다.

그림 10은 위상제어기의 위상 추정 특성을 나타내고 있다. 반주기 지점에서 제어기가 동작하여 초기 주파수 제한에 따른 지연시간으로 인해 정상상태 도달시간이 존재한다. 기존의 방식 및 제안한 방식 모두 PLL 제어에서 중요한 위상의 추정을 효과적으로 하고 있음을 알 수 있다.

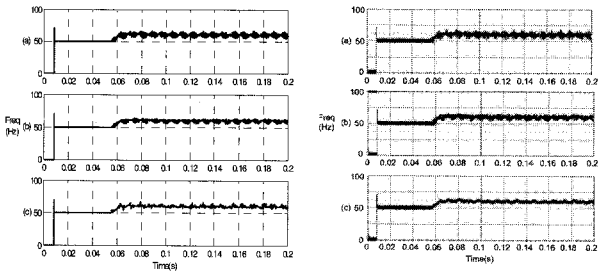


그림 11 주파수 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험)
 (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법

Fig. 11 Frequency estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment)
 (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer

그림 11은 위상제어기의 주파수 추정 특성을 나타내고 있다. 반주기 지점에서 동작하여 주파수 제한이 있기 때문에 초기 제한값인 50Hz로 동작하며 0.06초 부근에서 정상상태로 진입하였다. 또한 랜덤노이즈의 영향으로 인해 정상상태에서 리플이 발생하며 제한한 방식이 기존방식보다 정상상태 오차 특성이 우수함을 확인할 수 있다.

2.4.2 고조파 주입 실험결과

그림 12는 2상 전압 발생기의 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압을 나타내고 있다. 초기 위상오차가 180도가 되는 지점에서 동작하여 기존방식 및 제안한 방식 모두 0.02초 부근에서 정상상태로 수렴하고 있다. 주입 고조파의 영향으로 인해 기존방식에서는 고조파 성분이 포함되어 나타나고 있다. 제안한 방식에서 고조파를 고려하지 않은 방식도 기존의 방식보다 고조파 성분이 줄어들었고 일부 그 성분이 남아있으나, 고조파를 고려한 경우에는 이러한 고조파의 영향을 줄이고 기본파 성분을 출력하여 기존 방식보다 더 나아짐을 알 수 있다.

그림 13은 2상 진폭 전압을 나타내고 있다. 정상상태에서 기존의 방식은 고조파의 영향으로 인해 정상상태 리플이 발생하고 있으며 제안한 방식 중 고조파를 고려하지 않은 방식에도 고조파 성분이 남아있음을 알 수 있다. 고조파를 고려하여 전차원 상태관측기를 구성할 경우 고조파의 영향을 줄이고 기본파 성분을 출력하기 때문에 기존방식보다 오차 특성이 우수함을 확인할 수 있다.

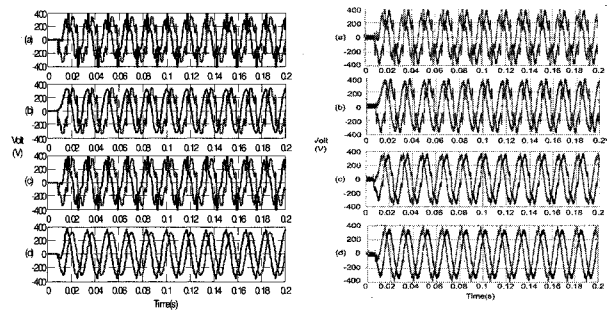


그림 12 2상 전압 발생기의 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s 전압 (좌: 모의실험, 우: 실제실험)

(a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법(고조파를 고려하지 않은 경우), (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려한 경우)

Fig. 12 \hat{v}_d^s, \hat{v}_q^s voltage of two phase generator (Left: simulation, Right: experiment)

(a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer(without harmonics consideration), (d)Method using full-order state observer(with harmonics consideration)

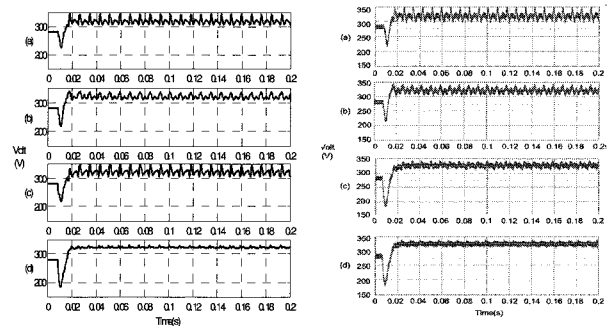


그림 13 진폭 전압 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험)
 (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려하지 않은 경우), (d)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려한 경우)

Fig. 13 Amplitude estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment)
 (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer(without harmonics consideration), (d)Method using full-order state observer(with harmonics consideration)

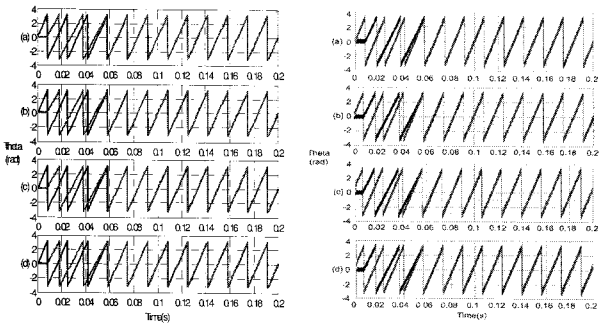


그림 14 위상 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험)
 (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려하지 않은 경우), (d)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려한 경우)

Fig. 14 Phase estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment)
 (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer(without harmonics consideration), (d)Method using full-order state observer(with harmonics consideration)

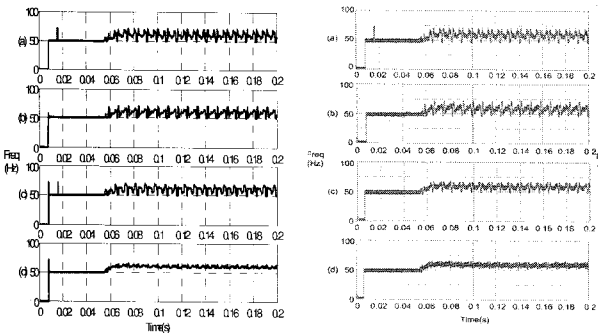


그림 15 주파수 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험)
 (a)전역통과필터를 이용하는 방법, (b)2차 저역통과필터를 이용하는 방법, (c)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려하지 않은 경우), (d)전차원 상태관측기를 이용하는 방법(고조파를 고려한 경우)

Fig. 15 Frequency estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment)
 (a)Method using all pass filter, (b)Method using second low pass filter, (c)Method using full-order state observer(without harmonics consideration), (d)Method using full-order state observer(with harmonics consideration)

그림 14는 위상제어기의 위상 추정 특성을 나타내고

있다. 기존의 방식과 제안한 방식 모두 약 0.06초에서 정상상태에 도달하여 양호한 추정 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 15는 위상제어기의 주파수 추정 특성을 나타내고 있다. 주파수의 제한으로 인해 정상상태 도달 지연 시간이 있다. 주입된 5,7,9,11차 고조파의 영향으로 인해 기존의 방식에서 고조파로 인한 리플이 발생함을 확인할 수 있다. 제안한 방식에서 고조파를 고려하지 않은 경우 기존의 방식보다는 리플이 줄어들었으며, 고조파를 고려할 경우 주입된 고조파의 영향을 줄이고 기본과 성분을 출력함으로써 정상상태 특성이 우수함을 확인할 수 있다.

그림 16은 제안한 방식으로 5차 고조파를 검출한 실험이다. 전차원 상태 관측기의 고조파 검출 성능을 정확히 알아보기 위하여 기본과 성분과 함께 5차 고조파를 주입하여 실험하였으며 입력전압에 주입한 5차 고조파를 효과적으로 검출하고 있음을 알 수 있다.

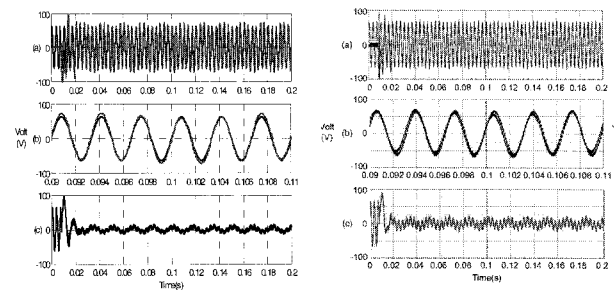


그림 16 고조파 추정 특성(좌: 모의실험, 우: 실제실험)
 (a)입력 고조파 대비 추정 출력 고조파, (b) 입력 고조파 대비 추정 출력 고조파(확대), (c)추정 고조파 오차 특성

Fig. 16 Harmonics estimation characteristics (Left: simulation, Right: experiment)
 (a)Input harmonics and estimated harmonics, (b)Input harmonics and estimated harmonics(extention), (c>Error characteristics of estimated harmonics

3. 결 론

지금까지 PLL 제어의 여러 방식들을 살펴보고 그 문제점을 진단하였다. 전원단 전압과 함께 주입된 저차 고조파 성분은 전체 제어 시스템에 영향을 주게 되어 전원 전력의 품질이 저하되는 요인으로 작용한다.^[7] 이러한 저차 고조파를 효과적으로 제거하기 위하여 본 논문에서는 전차원 상태관측기를 이용하여 단상 PLL

방식을 제안하고 고조파에 강인한 알고리즘을 제안하였다. 모의실험 및 실제실험을 통하여 제안한 방식이 랜덤노이즈(Random noise) 주입시 기존방법과 동일하거나 더 나은 특성을 보이고 있으며 5차 고조파 주입시 기본파 및 고조파를 분리하였으며 기본파 성분만을 출력하는 것을 확인하였다. 이로 인해 기존의 방식보다 가상 2상 발생기의 전압 특성과 정상상태 진폭 전압 및 주파수 특성이 기존방법보다 우수하였으며, 또한 효과적으로 고조파 성분을 제거 및 검출함을 입증하였다. 제안한 제어 방식은 전력품질제어의 다양한 분야에 쓰일 수 있으며 본 논문을 통하여 그 효과가 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.
This work is the outcome of a Manpower Development Program for Energy & Resources supported by the Ministry of Knowledge and Economy (MKE)

의 정상상태 성능개선“, *전력전자학회논문지*, 제9권 제4호, pp. 356-363, 2004. 8.

저 자 소 개



황희훈(黃熙勳)

1983년 7월 8일생. 2006년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2001년~현재 경북대 전자전기컴퓨터학부 부교수.

참 고 문 헌

- [1] CHUNG S-K, "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems", *IEE Proc Electr Power Appl.* Vol. 147, No. 3, pp. 213-219, 2000, May.
- [2] J. W. Choi, Y. K. Kim and H. G. Kim, "Digital PLL control for single-phase photovoltaic system", *Proceedings of the IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 1, pp. 40-46, 2006, January.
- [3] Sakamoto, S., Izumi, T., Yokoyama, T., and Haneyoshi, T. "A new method for digital PLL control using estimated quadrature two phase frequency detection", *Proc. PCC Osaka*, Vol. 2, pp. 671-676, 2002.
- [4] Andreon, S., Yaz, E.E., Olejniczak, K. J. Reduced-order estimation of power system harmonics using set theory", *Proceedings of the IEEE international conference on.* Vol. 1, pp. 820-825, 1999, August.
- [5] 정성중, 김종식, 이재원, 한도영 공역, *동적시스템제어*, 반도출판사, pp. 590-597, 1995.
- [6] 설승기, *전기기기제어론*, 홍릉과학출판사, pp. 191-195, 2005.
- [7] 정승기, "계통 고조파 현상의 원인 및 대책", *전력전자학회지*, 제5권 제1호, pp. 29-37, 2000, 2.
- [8] 정세교, 이대식, "PLL 기법을 이용한 단상 PWM 인버터