

## 정상분 전압 관측기를 이용한 불평형 3상 전원의 PLL

金亨修\*, 崔鐘宇†

## PLL for Unbalanced Three-Phase Utility Voltage using Positive Sequence Voltage Observer

Hyeong-Su Kim and Jong-Woo Choi

## 요 약

본 논문에서는 계통 전압이 불평형인 경우에 정확한 위상각을 검출할 수 있는 정상분 전압 관측기를 이용한 PLL(Phase Locked Loop) 방법을 제안한다. 제안된 PLL 방법은 기존의 전역 통과 필터(APF, All Pass Filter)를 이용하여 불평형 전원전압으로부터 정상분 전압을 구하는 것과는 달리 전차원 상태관측기를 사용함으로써 불평형사고 발생 시 추정위상각의 과도상태 응답특성을 개선하였다. 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법과 본 논문에서 제안된 PLL 방법의 성능을 비교하기 위해, 전원단 전압에 불평형 사고 발생시 위상각을 검출하는 실험을 하였고, 이를 통해 기존의 전역 통과 필터를 이용한 정상분 전압 추출 PLL 방법보다 제안된 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압 추출 PLL 방법의 과도상태 응답특성이 개선됨을 입증하였다.

## ABSTRACT

This paper proposes the PLL method using positive sequence voltage which is estimated by full-order state observer to find an accurate phase angle under the condition of unbalanced utility voltage. The proposed method uses the full-order state observer instead of existing method(APF All Pass Filter) to find a positive sequence of a utility voltage and this proposed method improves transient response of an estimated phase angle when a three-phase utility voltage becomes unbalanced. To compare proposed method with existing method, experiments have been done for a phase angle detection of utility voltage when a three-phase utility voltage becomes unbalanced. Their results show that transient state response of proposed method is improved.

**Key Words** : PLL(Phase Locked Loop), State observer, Unbalanced source, APF(All Pass Filter), Custom Power Devices

## 1. 서 론

전원단 전압의 위상각은 무정전 전원장치(UPS, Uninterruptible Power Supply), 동적 전압 보상기(DVR, Dynamic Voltage Restorer), 통합전력품질제어

기(UPQC, United Power Quality Controller) 등의 전력품질 향상용 전력전자기기 뿐만 아니라 분산전원 제어시스템과 같은 상용전원을 제어대상으로 하는 모든 시스템의 제어에 필수적인 정보이다. 왜냐하면 이러한 기기의 제어에서 전압, 전류의 지령치는 전원단 전압의 위상각과 동기 되어야만 그 의미가 있기 때문이다. 그리고 실제 상용전원은 완전한 평형을 이룬 전원은 존재하지 않으며, 고조파 전압도 포함하고 있기 때문에 위상각을 검출기는 왜곡된 전원단 전압조건 하에서도 빠르고 강인한 특성을 지녀야만 한다.

†교신저자 : 정회원, 경북대 전자전기컴퓨터학부 부교수

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

\*학생회원, 경북대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2007. 10. 24

1차 심사 : 2007. 12. 27

2차 심사 : 2008. 2. 19

심사완료 : 2008. 2. 28

기존의 전원단 전압의 위상각을 검출 방법으로 영전압 교차점(zero crossing)을 아날로그 회로를 이용하여 찾아내고, PLL을 이용하여 위상각을 검출하는 영전압 교차 PLL(Zero Crossing PLL) 방법이 있었다. 하지만 이 방법은 전원전압이 왜곡되거나 많은 노이즈를 포함할 경우 한 주기내에 여러 개의 영전압 교차점이 존재하여 위상검출에 오류가 발생할 수 있으며, 각 상의 위상차에 대한 고려가 없는 등 여러가지 문제점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 제안된 방법으로 동기좌표계 축에서 제어를 이용하여 실제 위상각과 추정 위상각의 오차가 없게 제어함으로써 위상각을 검출하는 "동기좌표계 PLL" 방법이 있다<sup>[1]</sup>. 하지만 이 방법도 전원단 전압이 불평형일 경우 동기 좌표계로 변환한 d축과 q축 전압에서 전원 주파수의 2배에 해당하는 맥동(ripple)전압이 발생하는 문제점이 있다. 이와 같은 위상각 검출 시 전원단 전압의 불평형에 의한 문제점은 불평형한 전원단 전압으로부터 평형한 정상분 성분만을 얻어내 이를 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용함으로써 개선할 수 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 불평형한 전원의 위상각을 전차원 상태관측기를 이용하여 검출하는 방법을 제안한다. 먼저 기존의 불평형한 전원의 위상각 검출 방법인 전역 통과 필터를 사용한 PLL 방법을 살펴보고, 불평형 사고 발생 시 과도상태 응답특성을 개선시킨 정상분 전압 관측기를 이용한 PLL 방법을 제안한다. 제안된 방법은 MATLAB Simulink를 통한 모의실험과 실험의 결과를 기존방식과 비교함으로써 그 우수성을 입증한다.

## 2. 기존의 정상분 전압 계산 방법

불평형한 전원전압에서 평형한 성분인 정상분 전압을 얻어내 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용하게 되면 불평형한 전압을 그대로 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용했을 때 동기좌표계 d축과 q축 전압에서 나타나는 전원단 주파수의 2배에 해당하는 맥동전압을 제거할 수 있다. 기존의 정상분 전압을 계산하는 방법은, 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{pa} \\ v_{pb} \\ v_{pc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}v_a - \frac{1}{j2\sqrt{3}}(v_b - v_c) \\ -(v_{pa} + v_{pc}) \\ \frac{1}{2}v_c - \frac{1}{j2\sqrt{3}}(v_a - v_b) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  이고,  $v_a, v_b, v_c$  와  $v_{pa}, v_{pb}, v_{pc}$  는 각각 전원단 3상 전압과 전원단 3상 전압의 정상분 성분이다.

식 (1)을 실제로 구현하기 위해서 사용되는 것이 90° 위상지연 필터인 전역 통과 필터이다. 그림 1은 전역 통과 필터를 사용해서 정상분 전압을 계산하는 블록도이다.

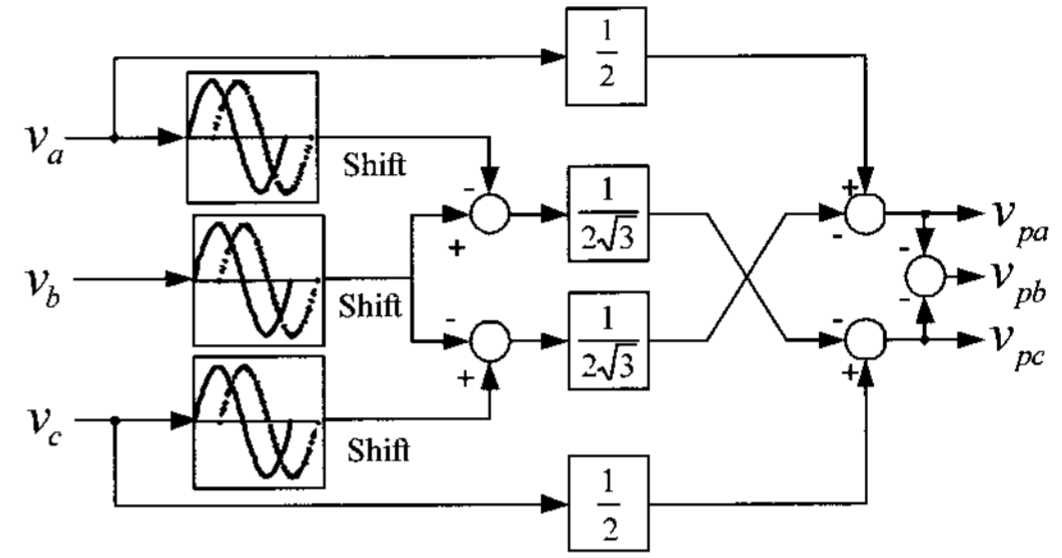


그림 1 전역 통과 필터를 이용한 정상분 전압계산  
Fig. 1 Positive sequence computation using APF

## 3. 제안한 전차원 상태 관측기를 이용한 정상분 전압 계산 방법

### 3.1 3상 불평형 전압의 전차원 상태관측기

불평형 3상 전압은 식 (2)와 같이 두 개의 평형한 3상 전압인 정상분 전압과 역상분 전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_p) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_p) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_p) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 첨자 p와 n은 각각 정상분 변수와 역상분 변수를 의미하며 3상 3선식을 가정하여 영상분 전압은 고려하지 않았다.

식 (2)을 d-q정지좌표계로 변환하면 아래의 식 (3)과 같고,

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_p) \\ \sin(\omega t + \phi_p) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_n) \\ -\sin(\omega t + \phi_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $v_{pd}^s, v_{pq}^s, v_{nd}^s, v_{nq}^s$  는 각각 정지좌표계 정상분 d-q전압과 역상분 d-q전압으로 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{pd}^s &= V_p \cos(\omega t + \phi_p) \\ v_{pq}^s &= V_p \sin(\omega t + \phi_p) \\ v_{nd}^s &= V_n \cos(\omega t + \phi_n) \\ v_{nq}^s &= -V_n \sin(\omega t + \phi_n) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 각 성분들을 미분하면 아래 식 (5)와 같고,

$$\begin{aligned} \dot{v}_{pd}^s &= -\omega V_p \sin(\omega t) = -\omega \cdot v_{pq}^s \\ \dot{v}_{pq}^s &= \omega V_p \cos(\omega t) = \omega \cdot v_{pd}^s \\ \dot{v}_{nd}^s &= -\omega V_n \sin(\omega t) = \omega \cdot v_{nq}^s \\ \dot{v}_{nq}^s &= -\omega V_n \cos(\omega t) = -\omega \cdot v_{nd}^s \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3), (5)로부터 식 (6)과 같은 상태방정식과 출력 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega \\ 0 & 0 & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

일반적인 전차원 상태 관측기 방정식은 식(7)과 같다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}) \quad (7)$$

여기서  $\hat{\mathbf{x}}$  는 상태변수  $\mathbf{x}$  의 추정치,  $\mathbf{L}$  은 전차원 상태관측기의 이득이다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\omega} & 0 & 0 \\ \hat{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\omega} \\ 0 & 0 & -\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} \\ l_{41} & l_{42} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (6)의 상태방정식과 출력방정식을 이용하여 전차원 상태 관측기를 구성하면 식(8)과 같이 정상분 전압과 역상분 전압을 상태변수로 하는 관측기 방정식을 구할 수 있다. 여기서,  $\hat{v}_{pd}^s, \hat{v}_{pq}^s, \hat{v}_{nd}^s, \hat{v}_{nq}^s$  는 정상분 d-q축 전압과 역상분 d-q축 전압의 추정치이고,  $\hat{\omega}$  는 전원의 추정각속도 이다.

### 3.2 비레이득 L 의 선정

식 (8)에서  $\begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} & l_{41} \\ l_{12} & l_{22} & l_{32} & l_{42} \end{bmatrix}^T$  는 전차원 상태관측기의 비레이득행렬이고 시스템 특성방정식의 근으로 결정한다. 비레이득행렬을 식 (9)와 같이 두면, 식 (8)의 상태관측기 방정식을 아래 식 (10)과 같은 복소수 형태로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} & l_{41} \\ l_{12} & l_{22} & l_{32} & l_{42} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} l_1 & -l_2 & l_3 & -l_4 \\ l_2 & l_1 & l_4 & l_3 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s - j\hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s - j\hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} j\hat{\omega} & 0 \\ 0 & -j\hat{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s - j\hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s - j\hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} l_1 - jl_2 \\ l_3 - jl_4 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_d^s + jv_q^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s - j\hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s - j\hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})]$$

$$\begin{aligned} &= \det \begin{bmatrix} s + (l_1 - j(\omega + l_2)) & l_1 - jl_2 \\ l_3 - jl_4 & s + (l_3 + j(\omega - l_4)) \end{bmatrix} \\ &= s^2 + \{(l_1 + l_3) - j(l_2 + l_4)\}s \\ &\quad + \{\omega^2 + \omega(l_2 - l_4) + j\omega(l_1 - l_3)\} \end{aligned} \quad (11)$$

특성방정식의 두 근을 중근  $\alpha$  로 두면, 식 (12)와 같은 식이 성립되고, 식 (13)과 같은 비레이득행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &s^2 + 2\alpha s + \alpha^2 \\ &= s^2 + \{(l_1 + l_3) - j(l_2 + l_4)\}s \\ &\quad + \{\omega^2 + \omega(l_2 - l_4) + j\omega(l_1 - l_3)\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} \\ l_{41} & l_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega} \\ \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega} & \alpha \\ \alpha & -\frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega} \\ \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega} & \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

그림 2는 전차원 상태관측기의 블록도이다. 3상 전압을 입력하면 정자좌표계 정상분 d-q전압과 역상분 d-q전압을 추정할 수 있다.

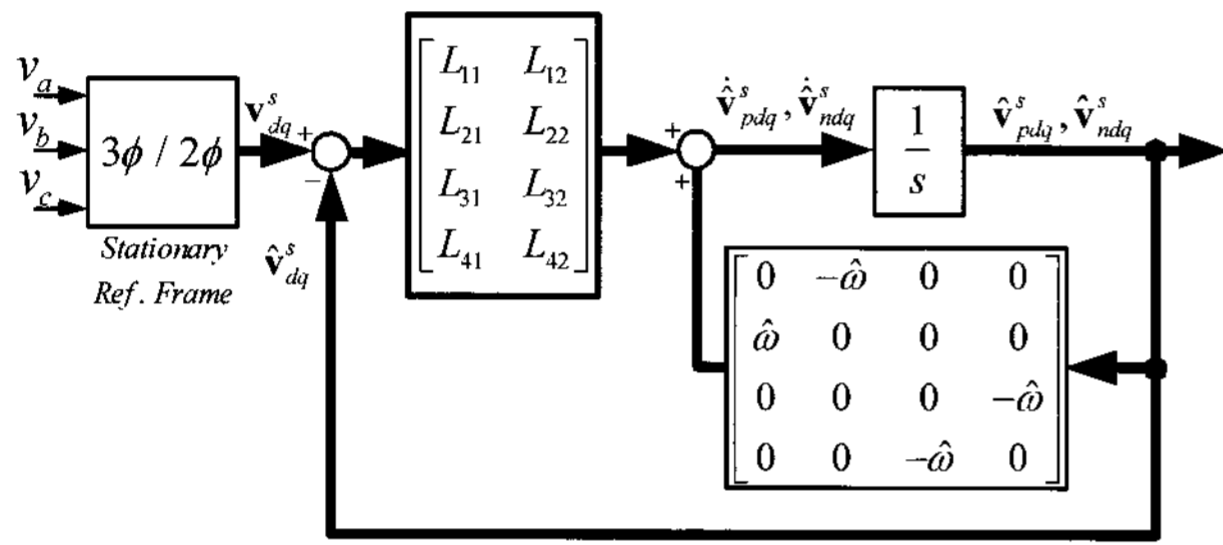


그림 2 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압 추출  
Fig. 2 Positive sequence computation using full order state observer

### 3.3 정상분 전압 관측기를 이용한 불평형 전원의 PLL

전차원 상태관측기 출력인 정상분 d-q축 전압으로부터 전원의 위상각을 검출하는 방법은 기존의 동기좌표계 PLL 방법과 같다. 정자좌표계 정상분 d-q축 전압을 추정한 위상각  $\hat{\theta}$ 로 동기좌표변환 했을 때 동기좌표계 dq전압은 식 (14)와 같고,

$$\begin{bmatrix} v_{pd}^e \\ v_{pq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \cos \theta \\ V_p \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p \cos(\hat{\theta} - \theta) \\ V_p \sin(\hat{\theta} - \theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

각 오차가 작을 경우에 동기좌표계 q축 전압은 식 (15)와 같이 각 오차에 비례한다.

$$v_{pq}^e = V_p \sin(\hat{\theta} - \theta) \approx V_p (\hat{\theta} - \theta) \quad (15)$$

그러므로 동기 좌표계 q축 전압이 영이 되도록 추정 위상각을 제어해 나가면 실제위상각과 추정위상각을

일치시킬 수 있다. 이는 기존의 동기좌표계 PLL 방법과 같다. 그리고 전원단에 사고 발생시 전차원 상태관측기의 과도상태 출력에 추정주파수가 급격하게 변동하는 것을 방지하기 위해 추정주파수를 일정한 범위로 제한하고, 이로 인한 적분기 오차누적의 대책으로 안티와인드업(anti-wind up)을 추가하였다<sup>[3]</sup>.

다음 그림 3은 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압추출 PLL 방법의 전체 블록도이다.

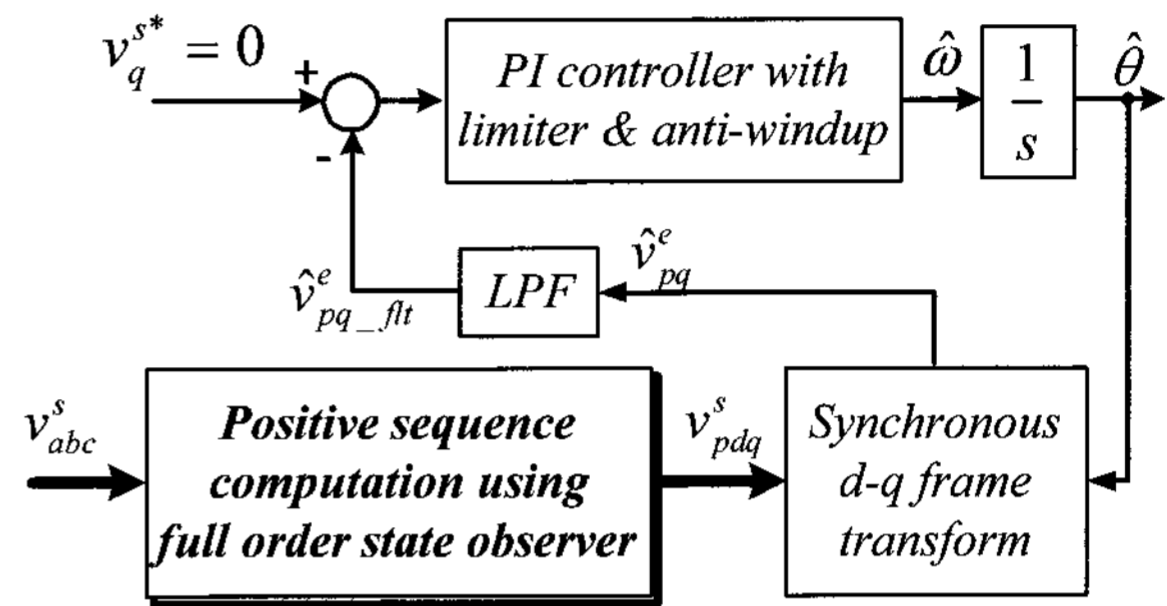


그림 3 전차원 상태관측기를 이용한 3상 불평형 전압의 PLL

Fig. 3 Block diagram of PLL for three-phase unbalanced voltage using full order state observer

## 4. 모의실험 및 실험

모의실험에는 MATLAB Simulink를 사용하였다. 전체 PLL시스템에서 정상분 전압을 계산하는 방법만 기존 방법과 제안한 방법으로 달리하여 불평형 사고 발생시 전원의 위상각과 정상분 및 역상분 전압의 크기 검출성능을 비교해 보았다. 실험조건은 아래 표 1과 같다.

표 1 모의실험 조건  
Table 1 Simulation condition

모의실험 실행시간		0 ~ 0.2 [s]
전원부	실효값	220 [V]
	불평형 지수(UF)	83.5 %
	불평형 크기 지수(MF)	20 %
	사고 발생시 $\phi_{UF}$	$\pm 5N^\circ$ (N=0,1,2,~36)
제어부	전차원 상태관측기	2500
	PI제어기 제어대역폭	300 [rad/s]

모의실험과 실험에서는 전원전압의 불평형 조건을 계량화 하기 위해 불평형 지수(UF: Unbalance Factor)와 불평형 크기 지수(MF: Magnitude Factor)의 개념을 사용한다<sup>[4]</sup>. 불평형 지수(UF)와 불평형 크기 지수(MF)는 식 (16)과 같이 정의된다.

$$\frac{\mathbf{V}_n}{\mathbf{V}_p} \equiv |UF| \angle \phi_{UF}, \quad \frac{\mathbf{V}_p}{\mathbf{V}_{rate}} \equiv |MF| \angle \phi_{MF} \quad (16)$$

여기서  $\mathbf{V}_{rate}$ ,  $\mathbf{V}_p$ ,  $\mathbf{V}_n$  는 각각 정격전압벡터, 정상분 전압벡터, 역상분 전압벡터를 나타낸다.

이때 불평형 지수(UF)는 정상분 전압벡터 크기에 대한 역상분 전압벡터 크기의 비를 의미하고, 불평형 크기 지수(MF)는 정격전압벡터 크기에 대한 정상분 전압벡터 크기의 비를 의미한다. 그리고  $\phi_{UF}$  는 정상분 전압벡터의 위상각에 대한 역상분 전압벡터의 위상차를 나타내며,  $\phi_{MF}$  는 정격전압벡터의 위상각에 대한 정상분 전압벡터의 위상차를 나타낸다.

3상 불평형 사고 발생시점에서의  $\phi_{UF}$  에 따라 과도상태 위상각 최대오차도 달라진다. 이를 고려하기 위해 사고 발생시  $\phi_{UF}$  를  $-180^\circ$ 에서  $180^\circ$ 까지  $5^\circ$ 간격으로 변화시켜 총 72회의 모의실험 및 실험을 각각 실시하였다. 모의실험에는 MATLAB Simulink를 사용하였고, 실제 실험에서는 제어프로그램으로 불평형 사고의 시작점을 조절할 수 있는 3상 교류전압공급기(TW5250)를 전원전압으로 사용하였으며, DSP(TMS320F2812) 보드를 사용하여 기존방법과 제안된 방법을 구현하였다.

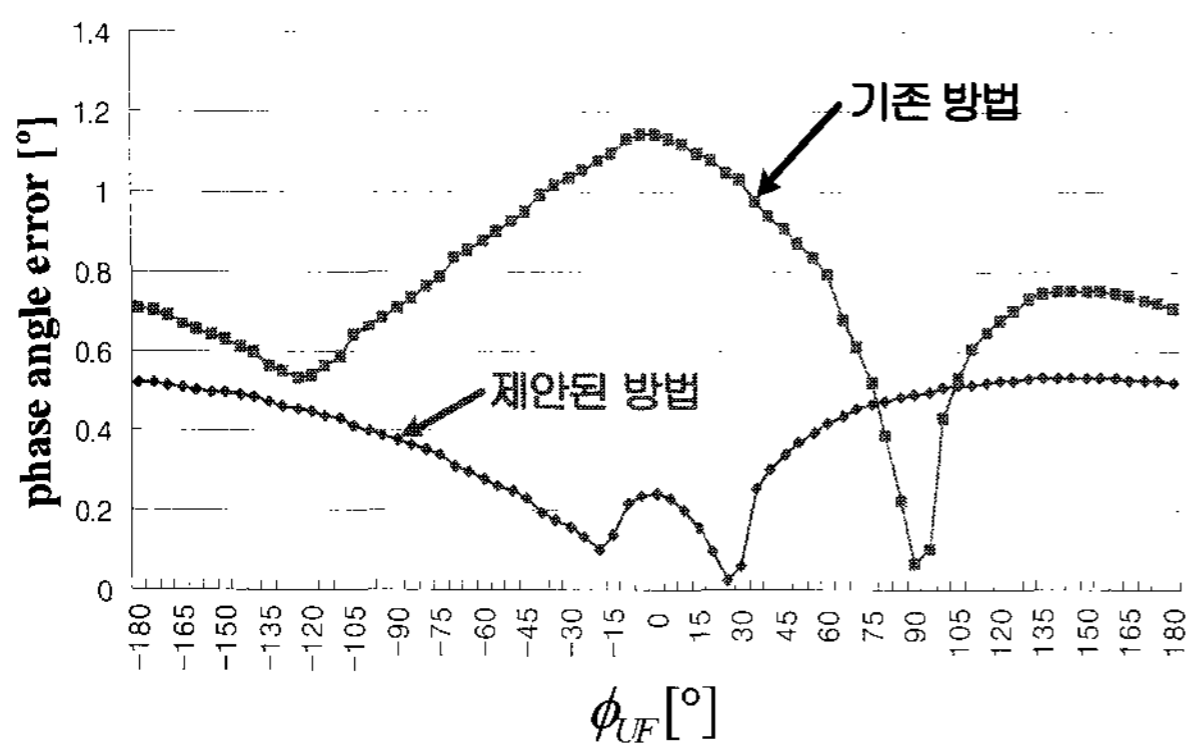


그림 4 불평형 사고발생시  $\phi_{UF}$  따른 위상각 최대오차  
Fig. 4 Maximum phase angle error according to  $\phi_{UF}$  at the starting point of fault

그림 4는 모의실험의 결과로 과도상태 추정위상각의 최대오차 절대값을 그래프로 나타낸 것이다. 제안된 방법의 최대오차가 전체의 약 7% 구간을 제외한 나머지 영역에서 기존 방법보다 작음을 알 수 있다. 최대오차의 크기도 기존방법의 최대오차  $1.1^\circ$ 의 절반인  $0.5^\circ$  정도로 감소했다.

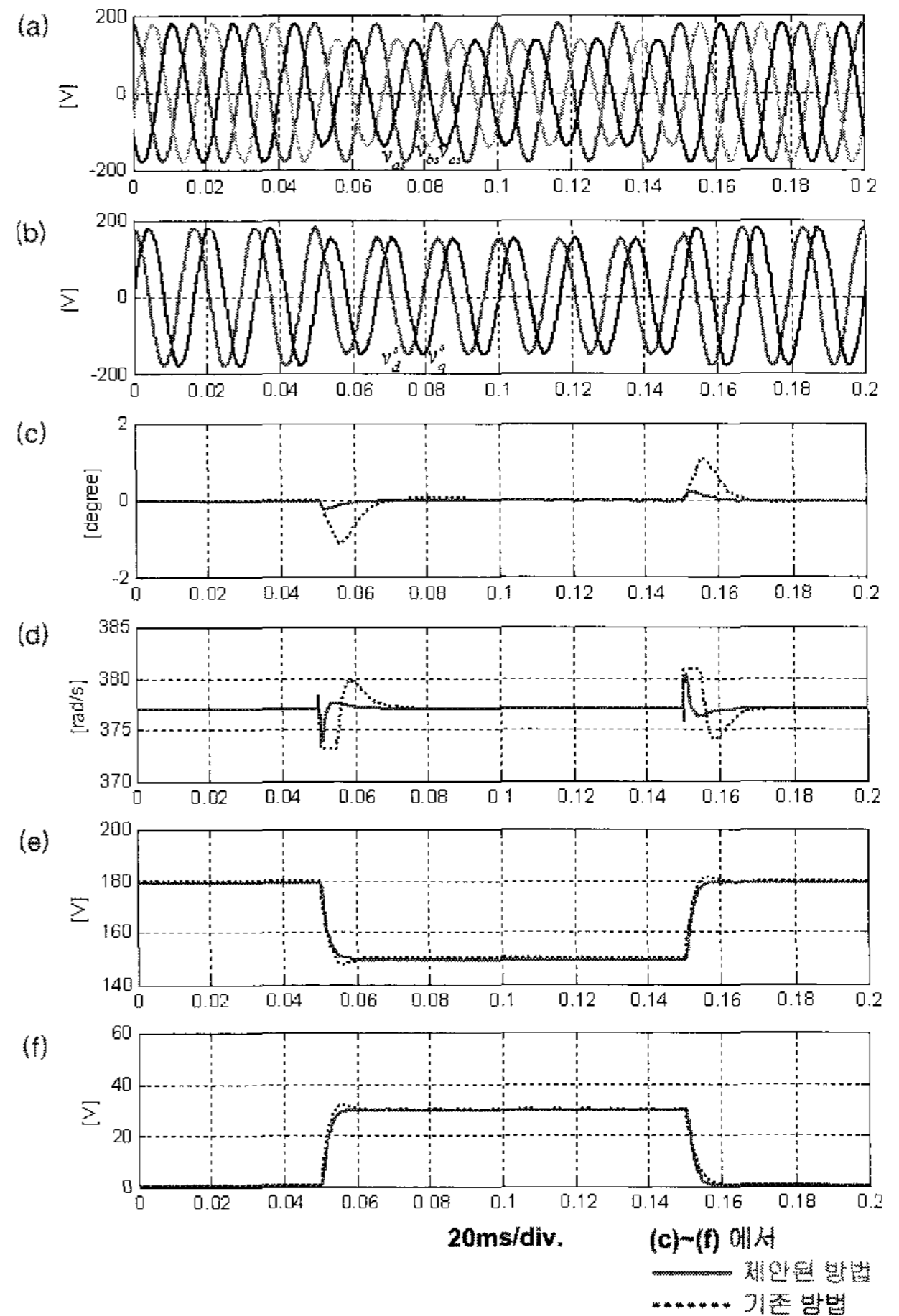


그림 5 모의실험 결과파형(사고 발생시  $\phi_{UF} = 0^\circ$ )  
(a) 전원단 전압, (b) 전차원 상태관측기로 추출한 d-q정지좌표계 정상분 전압, (c) 추정 위상각 오차, (d) 추정주파수, (e) 정상분 전압 추정진폭, (f) 역상분 전압의 추정 진폭

Fig. 5 Output waveform of simulation ( $\phi_{UF}$  at fault start point =  $0^\circ$ )  
(a) Source voltage, (b) Positive sequence voltage at stationary d-q frame computed by state observer, (c) Estimated phase angle error, (d) Estimated angular frequency, (e) Estimated magnitude of positive sequence voltage, (f) Estimated magnitude of negative sequence voltage



그림 5는 기존 방법대비 제안된 방법으로 큰 개선이 이루어지는 사고발생시  $\phi_{UF}$ 가  $0^\circ$ 일 때의 모의실험 결과로 0.05초에서 불평형 사고가 발생하고 0.15초에서 사고가 종료된다.

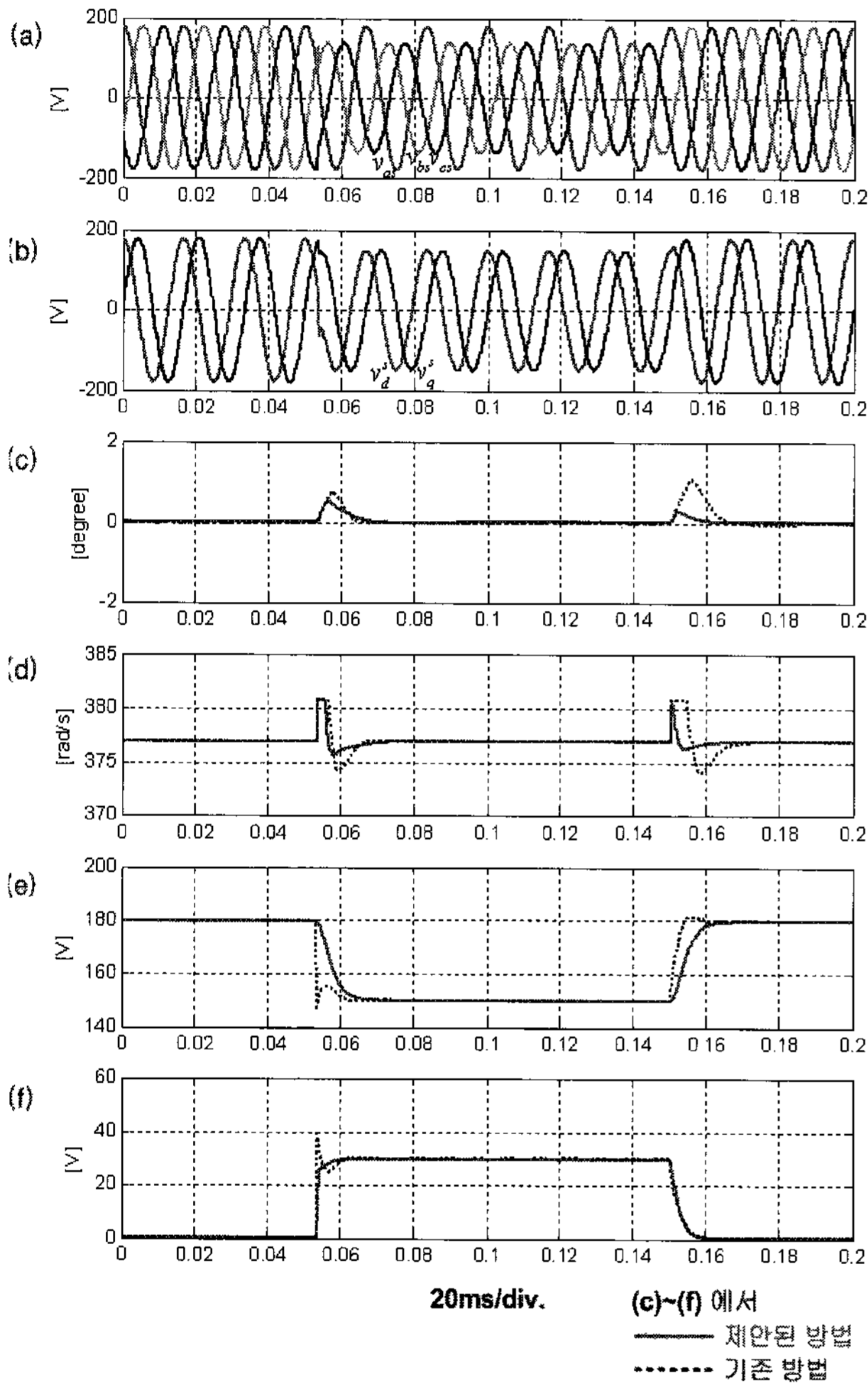


그림 6 모의실험 결과파형(사고 발생시  $\phi_{UF} = 140^\circ$ )

(a) 전원단 전압, (b) 전차원 상태관측기로 추출한 d-q정지좌표계 정상분 전압, (c) 추정 위상각 오차, (d) 추정주파수, (e) 정상분 전압 추정진폭, (f) 역상분 전압의 추정 진폭

Fig. 6 Output waveform of simulation ( $\phi_{UF}$  at fault start point =  $140^\circ$ )

(a) Source voltage, (b) Positive sequence voltage at stationary d-q frame computed by state observer, (c) Estimated phase angle error, (d) Estimated angular frequency, (e) Estimated magnitude of positive sequence voltage, (f) Estimated magnitude of negative sequence voltage

그림 5 (c)에서 사고발생 후 과도상태 위상각 최대 오차가 기존방법의  $-1.1^\circ$  대비 제안된 방법  $-0.25^\circ$ 로 오차의 크기가 약 75% 감소함을 확인할 수 있다.

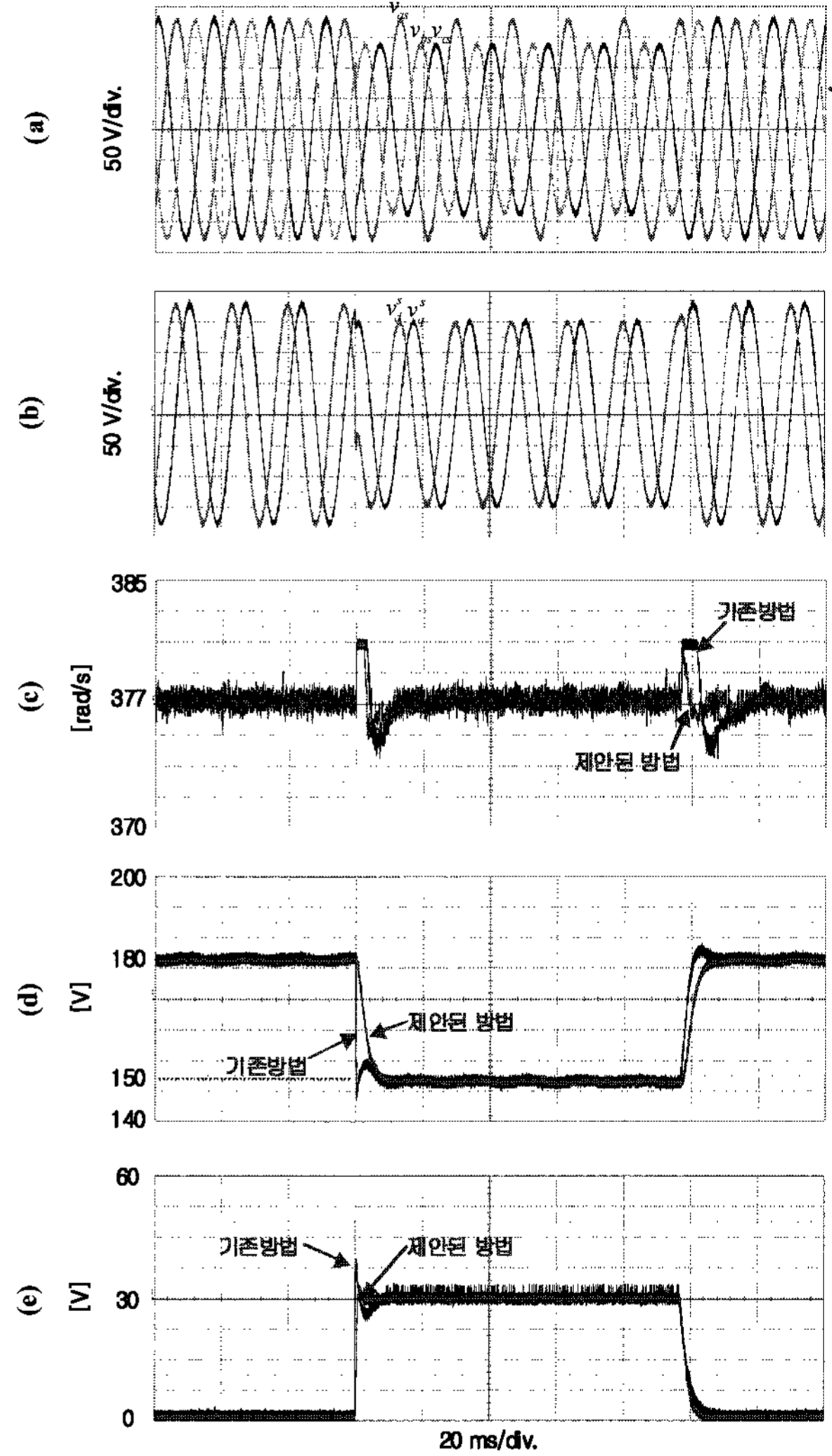


그림 7 실험 결과파형(사고 발생시  $\phi_{UF} = 140^\circ$ )

(a) 전원단 전압, (b) 전차원 상태관측기로 추출한 dq정지좌표계 정상분 전압, (c) 추정주파수, (d) 정상분 전압 추정진폭, (e) 역상분 전압의 추정 진폭

Fig. 7 Output waveform of experiment ( $\phi_{UF}$  at fault start point =  $140^\circ$ )

(a) Source voltage, (b) Positive sequence voltage at stationary d-q frame computed by state observer, (c) Estimated angular frequency, (d) Estimated magnitude of positive sequence voltage, (e) Estimated magnitude of negative sequence voltage

그림 5 (e)와 (f)에서는 기존방법과 같은 응답시간에 오버슈트 없이 정상분 전압벡터와 역상분 전압벡터의 크기를 추정함을 확인할 수 있다.

그림 6은 제안된 방법의 최대오차가 가장 큰, 사고 발생시  $\phi_{UF}$ 가  $140^\circ$ 이고,  $\phi_{UF}$ 가  $0^\circ$ 에서 사고가 종료할 경우의 모의실험이다. 성능이 가장 안 좋을 때에도 기존 방법에 비해 위상각 검출 성능과 전원단 주파수 추정 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 정상분 전압과 역상분 전압의 추정 성능 또한 기존방법과 비슷한 시간인 10ms정도에 오버슈트 없이 정상상태 도달한다.

그림 7은 그림 6의 모의실험과 같은 조건에서의 실험결과이다. 실제 실험에서는 실제 전원의 위상각을 알 수 없어서 위상각 오차는 측정 할 수는 없지만 추정 주파수를 적분한 값이 추정 위상각이기 때문에 과도상태 추정 주파수의 응답이 개선됐다면 위상각 오차도 줄었다고 볼 수 있다. 실제 실험에서도 모의 실험과 같이 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법의 과도상태 응답특성을 개선한 전차원 상태관측기를 이용한 3상 불평형 전원의 PLL 방법을 제안하였다. 이 PLL 방법은 기존의 전역 통과 필터를 사용하여 불평형한 전원단 전압에서 정상분 전압을 추출 하는 방법 대신 전차원 상태관측기로 추출한 전원단 전압의 정상분 전압을 PLL 함으로써 전원의 위상각을 검출한다. 기존의 방법은 전역 통과 필터 고유의 특성이 과도상태 추정성능을 결정짓는 반면, 전차원 상태관측기는 전체 시스템이 안정한 범위 안에서 시스템 특성방정식의 근의 위치를 변화시킴으로써 원하는 성능을 얻을 수 있다. 모의실험과 실험을 통해 기존방법과 제안된 방법을 비교함으로써 과도상태 응답특성이 개선되었음을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2007-0-261-01)에 의한 마이크로그리드 연구센터 주관으로 수행된 과제임.

### 참 고 문 헌

[1] V. Kaura, V. Blasko, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions",

*IEEE Trans. Ind. App.*, Vol. 33, No. 1, pp. 58-63, 1997, Jan./Feb.

[2] Sang-Joon Lee, "New PLL Method and Voltage Controller of Series Compensator for Voltage Sag Compensation", PH.D Thesis. 2003.

[3] 지준근, 김효성, 설승기, 김경환, "무정전전원장치에 적합한 주파수 제한기와 안티 와인드업을 가지는 PLL 방식", *전력전자학술대회논문집*, pp. 778-782, 2004. 7.

[4] A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay, "Analysis and Design of a Series Voltage Compensator for Three-Phase Unbalanced Sources", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 39, No. 2, pp. 159-167, 1992.

### 저 자 소 개

#### 김형수(金亨修)

1980년 11월 5일생. 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.

