

전차원 상태관측기를 이용한 3상 불평형 전원의 PLL 성능 개선

김형수, 최종우
경북대학교

Improvement of PLL performance for three-phase unbalanced voltage source using full order state observer

Hyeong-Su Kim, Jong-Woo Choi
Kyungpook National University

Abstract

본 논문에서는 전력품질 향상용 전력전자기기의 제어에 중요한 정보인 전원의 위상각을 검출하는 기존의 방법들에 대해서 먼저 알아보고, 그 중 불평형한 전원단 전압조건에서도 정확한 위상각을 검출할 수 있는 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압 추출 PLL(Phase Locked Loop) 방법을 제안한다. 제안된 PLL 방법은 기존의 전역 통과 필터(APF, All Pass Filter)를 이용한 정상분 전압추출기 대신 전차원 상태관측기를 사용함으로써 불평형사고 발생 시 과도상태 응답특성을 개선하였다. 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법과 본 논문에서 제안된 PLL 방법의 성능을 비교하기 위해, 전원단 전압에 불평형 사고 발생시 위상각을 검출하는 모의실험과 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.

1. 서 론

전원단 전압의 위상각은 무정전 전원장치(UPS, Uninterruptible Power Supply), 동적 전압 보상기(DVR, Dynamic Voltage Restorer), 통합 전력품질제어기(UPOC, United Power Quality Controller) 등의 전력품질 향상용 전력전자기기 뿐만 아니라 분산전원 제어시스템과 같은 상용전원을 제어대상으로 하는 모든 기기, 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 검출하는 왜곡된 전원단 전압조건 하에서도 빠르고 강인한 특성을 지녀야만 한다.

기존의 전원단 전압의 위상각을 검출 방법으로 영전압 교차점(zero crossing)을 아날로그 회로를 이용하여 찾아내서 PLL을 이용하여 위상각을 검출하는 영전압 교차 PLL(Zero Crossing PLL) 방법이 있었다. 하지만 이 방법은 전원전압이 왜곡될 경우 한주기내에 여러 개의 영전압 교차점이 존재할 수 있으며, 각 상의 위상차에 대한 고려가 없는 등 문제점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 제안된 방법으로 동기좌표계 축에서 제어기를 이용하여 실제 위상각과 추정위상각의 오차가 없게 제어함으로써 위상각을 검출하는 "동기좌표계 PLL" 방법이 있다. 하지만 이 방법도 전원단 전압이 불평형할 경우 동기 좌표계로 변환한 d 축과 q 축 전압에서 전원 주파수의 2 배에 해당하는 맥동(ripple)전압이 발생하는 문제점이 있다. 이와 같은 위상각 검출 시 전원단 전압의 불평형에 의한 문제점은 불평형한 전원

단 전압으로부터 평형한 정상분 성분만을 추출해 이를 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용함으로써 개선할 수 있다.

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

2. 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법^[1]

기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법은 불평형한 전원전압에서 평형 전압인 정상분 전압을 얻어내 기존의 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용한다. 이렇게 하면 기존의 동기좌표계 PLL 방법에서 동기좌표계 d축과 q축 전압에서 나타나는 전원단 주파수의 2배에 해당하는 맥동전압을 제거할 수 있다. 이처럼 동기좌표계 PLL 방법과 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법의 차이는 정상분 전압 추출에 있다. 기존의 PLL에서 정상분을 추출하는 방법을 살펴보면, 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 위해서는 90°의 위상지연 필터인 전역 통과 필터를 사용하게 된다. 그림 1은 전역 통과 필터를 사용해서 정상분 전압을 추출하는 블록도이다.

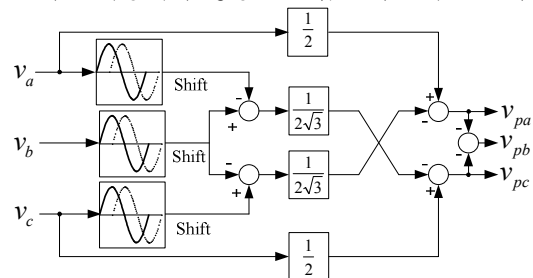


그림 1 전역 통과 필터를 이용한 정상분 전압 추출
Fig. 1 Positive sequence computation using APF

3. 제안한 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압 추출 PLL 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.

$$\mathbf{v}_{abc} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)을 dq정지좌표계로 변환하면 아래의 식 (3)과 같고,

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ -\sin(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $v_{pd}^s, v_{pq}^s, v_{nd}^s, v_{nq}^s$ 는 식 (4)와 같다.

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

식 (3), (4)로부터 상태방정식을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega \\ 0 & 0 & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pd}^s \\ v_{pq}^s \\ v_{nd}^s \\ v_{nq}^s \end{bmatrix}$$

식 (5)의 상태방정식을 이용하여 전차원 상태관측기를 구성하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\omega} & 0 & 0 \\ \hat{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\omega} \\ 0 & 0 & -\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} \\ l_{41} & l_{42} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{pd}^s \\ \hat{v}_{pq}^s \\ \hat{v}_{nd}^s \\ \hat{v}_{nq}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

여기서 $\begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} & l_{41} \\ l_{12} & l_{22} & l_{32} & l_{42} \end{bmatrix}^T$ 는 전차원 상태관측기의 비례 이득이고, 식 (7)의 시스템 특성방정식의 근으로 결정한다.

$$\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})] = \det \begin{bmatrix} s + l_{11} & \omega + l_{12} & l_{11} & l_{12} \\ -\omega + l_{21} & s + l_{22} & l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} & s + l_{31} & -\omega + l_{32} \\ l_{41} & l_{42} & \omega + l_{41} & s + l_{42} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 특성방정식을 구할 수 있으며, 특성방정식의 네 근을 4중근 α 로 모두 같게 두면, 비례이득행렬은 식 (8)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} l_{11} = l_{22} = l_{31} = l_{42} &= \alpha \\ l_{12} = l_{41} &= \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega}, \quad l_{21} = l_{32} = -\frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{2\omega} \end{aligned} \quad (8)$$

그림 2는 전차원 상태관측기의 블록도이다. 3상 전압을 입력하면 정지좌표계 정상분 dq전압과 역상분 dq전압을 구할 수 있다.

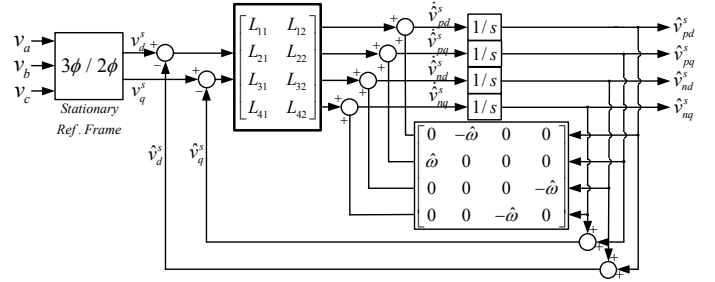


그림 2 전차원 상태관측기를 이용한 정상분 전압 추출
Fig. 2 Positive sequence computation using full order state observer

3.2 전차원 상태관측기를 이용한 불평형 전원의 PLL

전차원 상태관측기 출력인 정상분 dq전압으로부터 전원의 위상각을 검출하는 방법은 기존의 동기좌표계 PLL 방법과 같다. 정지좌표계 정상분 dq전압을 추정한 위상각 $\hat{\theta}$ 로 동기좌표변환 했을 때 동기좌표계 dq전압은 식 (9)와 같고,

$$\begin{bmatrix} v_{pd}^e \\ v_{pq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \cos \theta \\ V_p \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p \cos(\hat{\theta} - \theta) \\ V_p \sin(\hat{\theta} - \theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

각 오차가 작을 경우에 동기좌표계 q축 전압은

$$v_{pq}^e \approx V_p(\hat{\theta} - \theta) \quad (9')$$

가 된다. 그러므로 동기 좌표계 q축 전압이 영이 되도록 추정위상각을 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 범위 안으로 제한하고, 이로 인한 적분기 오차누적의 대책으로 안티와인드업(anti-wind up)을 추가하였다^[2].

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

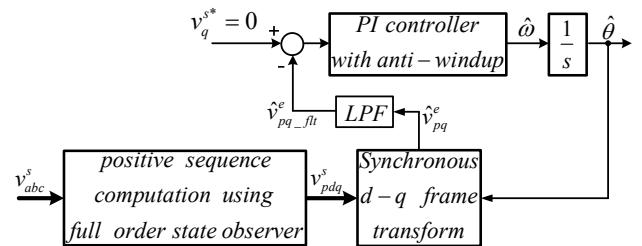


그림 3 전차원 상태관측기를 이용한 3상 불평형 전압의 PLL
Fig. 3 Block diagram of PLL for three-phase unbalanced voltage using full order state observer.

4. 모의실험 및 실험

모의실험에는 MATLAB Simulink를 사용하였고, 불평형 사고 발생시 전원의 위상각 및 정상분역상분 전압의 크기 검출성을 기존의 정상분 추출 PLL 방법과 비교해 보았다. 실험조건은 아래 표 1과 같다. 모의실험과 실험에서는 전원전압의 불평형 조건을 계량화 하기 위해 불평형 지수(UF: Unbalance Factor)와 불평형 크기 지수(MF: Magnitude Factor)의 개념을 도입한다^[3]. 전원단의 정격전압을 V_{rate} 라고 하면, 불평형 지수(UF)와 불평형 크기 지수(MF)는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\frac{V_n}{V_p} \equiv |UF| \angle \phi_{UF}, \quad \frac{V_p}{V_{rate}} \equiv |MF| \angle \phi_{MF} \quad (10)$$

여기서 ϕ_{UF} 는 역상분 전압의 위상각과 정상분 전압의 위상차이다.

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 ϕ_{UF}	5N° (N=1,2,...,72)
제어부	전차원 상태관측기	2500
	PI제어기 제어대역폭	300 [rad/s]

사고 발생시점에서 ϕ_{UF} 에 따라 따라 위상각 최대오차도 달라진다. 이를 고려하기 위해 사고 발생시 ϕ_{UF} 를 0°에서 360°까지 5°간격으로 72회 반복해서 사고를 발생시키고, 각 사고지점에서의 추종위상각의 최대오차 절대값을 그래프로 나타내면 그림 4와 같다. 제안된 방법의 최대오차가 전체의 약 7% 구간을 제외한 나머지 영역에서 기존 방법보다 작음을 알 수 있다. 최대오차의 크기도 기존방법의 최대오차 1.1°의 절반인 0.5° 정도로 감소했다. 그림 5는 제안한 방법의 최대오차가 가장 큰, 사고 발생시 ϕ_{UF} 가 140°인 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 10ms 정도에 오버슈트 없이 정상상태 도달한다.

그림 6은 그림 5의 모의실험과 같은 조건에서의 실험 결과이다. 실제 실험에서는 실제 전원의 위상각을 알 수 없어서 위상각 오차는 측정할 수는 없지만 추정 주파수를 적절한 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. 실험에는 DSP보드(TMS320C2812)와 교류전압공급기(TW5250)를 사용하였다.

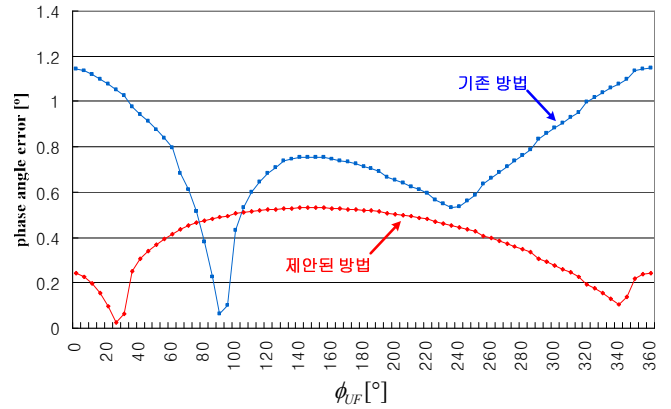


그림 4 불평형 사고발생시 ϕ_{UF} 따른 위상각 최대오차

Fig. 4 Maximum phase angle error according to ϕ_{UF} at the point of fault Starting

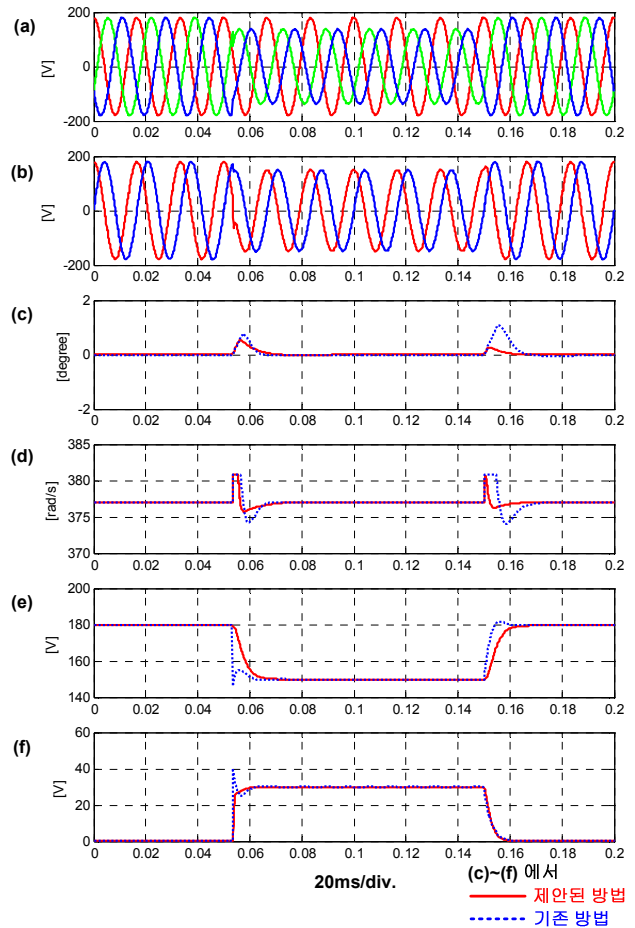


그림 5 (a) 전원단 전압, (b) 전차원 상태관측기로 추출한 dq표계 정상분 전압, (c) 추정 위상각 오차, (d) 추정 주파수, (e) 정상분 전압 추정진폭, (f) 역상분 전압의 추정 진폭

Fig. 5 (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

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전
력연구원(R-2005-7-067)주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- [1] Sang-Joon Lee, "New PLL Method and Voltage Controller of Series Compensator for Voltage Sag Compensation," PH.D Thesis. 2003.
- [2] 지준근, 김효성, 설승기, 김경환, "무정전전원장치에 적합한 주파수 제한기와 안티 와인드업을 가지는 PLL 방식", 전력전자학술대회논문집, pp. 778~782, 2004. 7.
- [3] 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.

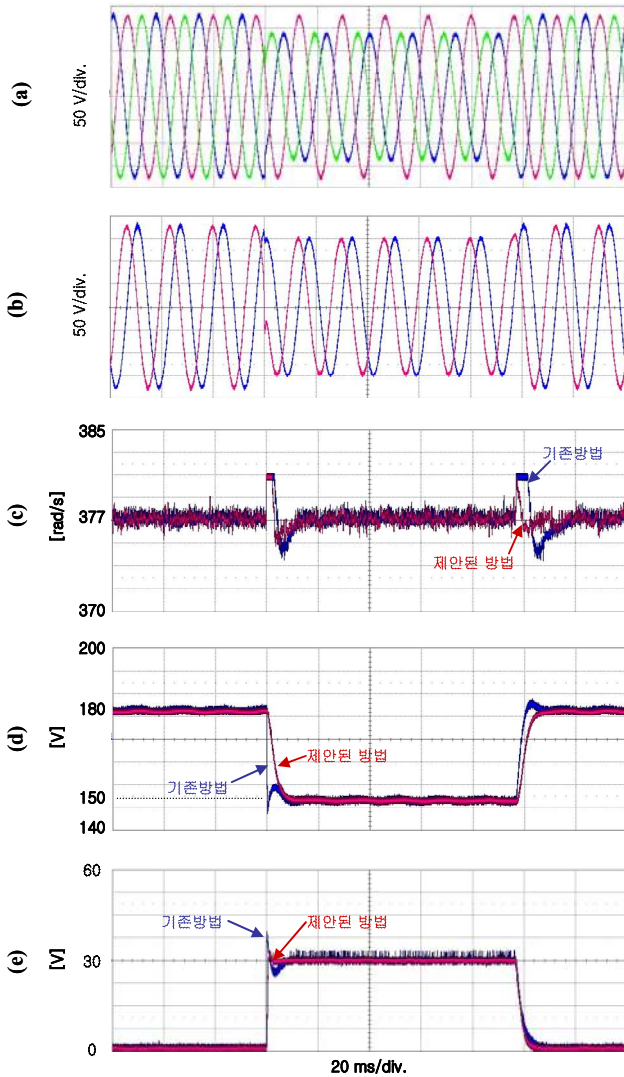


그림 6 (a) 전원단 전압, (b) 전차원 상태관측기로 추출한 dq정지 좌표계 정상분 전압, (c) 추정주파수, (d) 정상분 전압 추정 진폭, (e) 역상분 전압의 추정 진폭
Fig. 6 (a) Source voltage, (b) Positive sequence voltage at stationary d-q frame computed by state observer, (c) Estimated angular frequency, (d) Estimated magnitude of positive sequence voltage, (e) Estimated magnitude of negative sequence voltage

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.