

상태관측기를 이용한 왜곡된 3상 전원의 PLL

김형수, 김광섭
(주)포스콘 기술연구소

PLL for Distorted Three-phase Voltage Source using State Observer

Hyeong-Su Kim, Kwang-Seob Kim
POSCON corporation R&D center

Abstract

본 논문에서는 불평형, 고조파, 잡음 등에 의해 왜곡된 3상 전원에서부터 정확한 위상각을 검출하는 PLL(Phase Locked Loop) 방법을 제안한다. 역상분과 고조파를 포함하는 왜곡된 3상 전원을 동기좌표계 d-q축 전압으로 변환하면 기본과 성분에 의한 일정한 d-q축 전압에 역상분과 고조파에 의한 맥동이 포함된 형태의 전압이 된다. 상태관측기는 이러한 전압에서 맥동성분을 제거하고 기본과 전압만 추출하여 이를 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용함으로써 왜곡된 전원 조건에서도 정확한 위상각을 검출할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

최근 전력품질 문제에 대한 인식의 확산, 신재생 에너지의 상용화, 분산전원 시스템에 대한 연구확대 등의 사회적 추세는 상용전원과 연관된 전력전자 기기들에 대한 활발한 연구로 이어지고 있다. 이러한 기기에는 무정전 전원장치(UPS, Uninterruptible Power Supply), 배전용 정지형 보상기(DSTATCOM, Distributional Static Compensator), 동적전압 보상기(DVR, Dynamic Voltage Restorer) 등의 전력품질 향상용 전력전자기와 계통연계형 인버터 등이 대표적이다. 이와 같이 계통전원과 연계되어 동작하는 기기를 제어하는데 있어 전원의 위상각은 필수적인 정보이며 정확한 위상각의 검출여부는 곧 기기의 성능과 직결된다. 그리고 실제 상용전원은 완벽한 정현파가 아니고 불평형, 고조파, 잡음 등을 포함하고 있다는 점을 고려했을 때 위상각 검출기는 왜곡된 전원조건에서도 강인한 특성을 지녀야만 한다.

본 논문에서는 상태관측기를 이용하여 추정된 정상분 전압을 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용함으로써 역상분과 고조파를 포함한 왜곡된 3상 전원조건에서도 강인한 특성을 지닌 위상각 검출 방법을 제안 한다. 제안된 방법의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법^[1]

기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법은 불평형한 전원전압에서 전역통과필터(APF, All Pass Filter)를 이용하여 정상분 전압을 추출하고 이를 동기좌표계 PLL^[2]의 입력으로

사용해서 불평형한 전원조건에서 위상각을 검출한다. 또한 동기좌표계로 변환된 q축 전압에 저역통과필터(LPF, Low Pass Filter)를 사용하여 고조파와 잡음의 영향을 감소시킨다. 하지만 이때 사용되는 필터는 시스템이 안정한 범위 내에서 사용되어야 하므로 고조파의 영향을 완벽히 제거할 수 없다. 그림 1은 기존의 정상분 전압 추출 동기좌표계 PLL 방법의 구성도이다. 고조파 및 잡음의 영향을 제거하기 위해 저역통과 필터가 사용된 것을 알 수 있다.

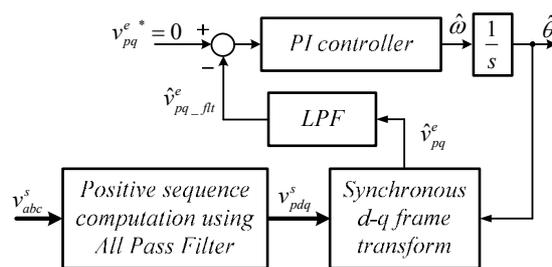


그림 1 정상분 전압 추출 동기좌표계 PLL 방법
Fig. 1 Conventional synchronous PLL method using positive sequence voltage

3. 상태관측기를 이용한 PLL 방법

직류에 특정한 주파수의 맥동이 포함되어 있는 신호는 식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$x(t) = x_{dc}(t) + x_{rip}(t) = D + R \cos(\omega_{rip}t)$$

$$\begin{cases} x_{dc}(t) = D \\ x_{rip}(t) = R \cos(\omega_{rip}t) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 ω_{rip} 는 맥동의 주파수이다.

직류성분과 맥동성분을 추정하기 위한 상태관측기를 구성하기 위해 식 (2)와 같이 맥동성분과 90°의 위상차를 가진 가상의 신호가 있다고 가정한다.^[3]

$$x_{rip_quad}(t) = R \sin(\omega_{rip}t) \quad (2)$$

이 경우 식 (3)과 같은 상태변수 \mathbf{x} 를 얻을 수 있고, 식 (1)과 식 (3)으로부터 식 (4)의 상태방정식과 식(5)의 출력

방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{dc} \\ x_{rip} \\ x_{rip_quad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ R \cos(\omega_{rip} t) \\ R \sin(\omega_{rip} t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{dc} \\ x_{rip} \\ x_{rip_quad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_{rip} \\ 0 & \omega_{rip} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{dc} \\ x_{rip} \\ x_{rip_quad} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$y = \mathbf{Cx}$$

$$x(t) = [1 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} x_{dc} \\ x_{rip} \\ x_{rip_quad} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{A} 는 시스템 행렬, \mathbf{B} 는 입력 행렬, \mathbf{C} 는 출력 행렬이다. 식 (4)와 식 (5)로 상태관측기를 구성하면 식 (6)과 같다.

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{x}_{dc} \\ \hat{x}_{rip} \\ \hat{x}_{rip_quad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_{rip} \\ 0 & \omega_{rip} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{dc} \\ \hat{x}_{rip} \\ \hat{x}_{rip_quad} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \left\{ y - [1 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{x}_{dc} \\ \hat{x}_{rip} \\ \hat{x}_{rip_quad} \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{L} 은 상태관측기의 비례이득이다. 비례이득의 값은 상태관측기 오차식의 특성방정식 근의 위치로 정할 수 있다.

식 (6)의 상태관측기를 블록다이어그램으로 나타내면 그림 2와 같다. 상태변수인 직류성분과 맥동성분을 추정할 수 있다.

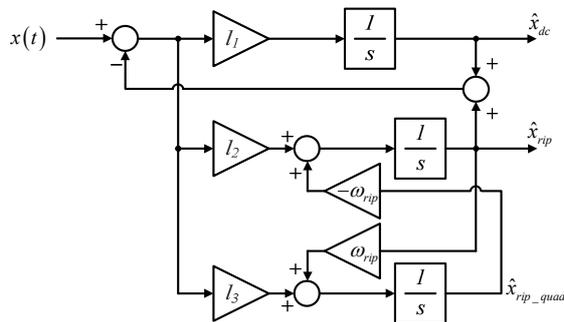


그림 2 상태관측기 블록다이어그램
Fig. 2 Block diagram of state observer

상태관측기에서 추정하고자 하는 주파수의 맥동성분 이외의 다른 신호가 포함 되어있다면 이는 시스템의 외란으로 볼 수 있다. 그 외란이 일정한 주파수를 가진 정현파 또는 그 합이라면 직류성분과 관측대상인 맥동성분의 추정치에는 외란의 주파수와 같은 오차가 발생한다. 하지만 외란의

주파수를 알고 있다면 그 주파수가 ω_{rip} 인 또 다른 상태 관측기를 사용하여 직류성분을 추정할 수 있다.

불평형, 고조파 전압 등으로 왜곡된 3상 전원을 동기좌표계 변환한 d-q축 전압은 기본과 정상분 전압이 변환된 직류성분과 불평형에 의한 전원주파수 2배의 맥동성분, 그리고 고조파 전압에 의한 맥동성분의 합으로 나타난다. 이러한 동기좌표계 d-q축 전압으로부터 상태관측기를 이용하여 기본과 정상분 전압에 해당하는 직류성분만 알 수 있다면 전원의 위상각을 구할 수 있다. 이 때 사용되는 상태관측기는 제거하고자 하는 맥동성분의 수만큼 직렬 연결하여 사용한다. 그림 3은 상태관측기를 이용한 PLL 방법의 구성도이다.

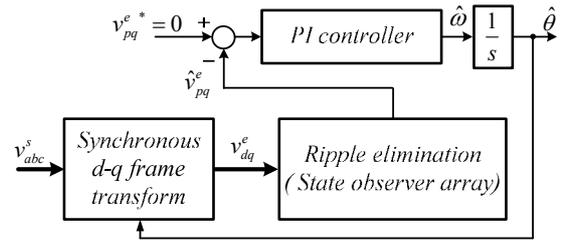


그림 3 제안된 상태관측기 이용한 PLL 방법
Fig. 3 Proposed PLL method using state observer

4. 시뮬레이션 결과

위상각 검출할 대상인 3상 전원은 그림 4와 같다. 왜곡된 위상각 검출 성능과 시스템의 과도상태 응답특성을 검증하기 위해 전원을 구간 1과 구간 2로 나누어 실험을 하였다. 구간 1에서는 평형한 3상 전원에 5, 7, 11차 고조파가 포함된다. 구간 2에서는 구간 1의 조건에서 3상 불평형한 상태가 더해진다.

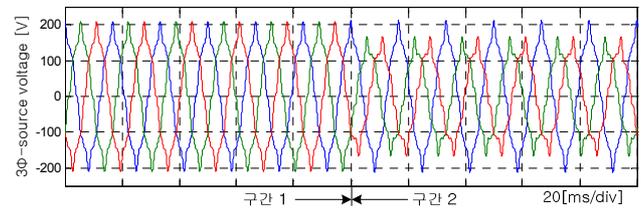


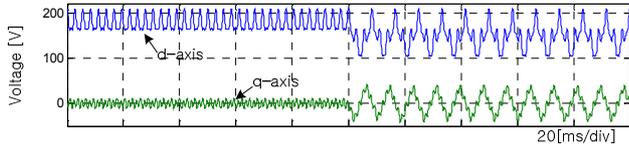
그림 4 왜곡된 3상 전원전압 파형
Fig. 4 Waveform of distorted 3-phase source voltage

시뮬레이션에는 MATLAB Simulink를 사용하였고, 기타 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

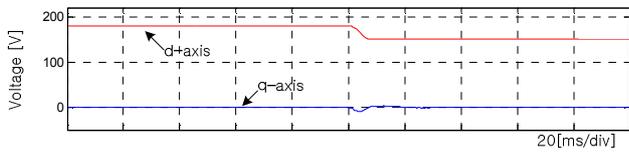
표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation condition

	조 건	비 고
전원전압	220[V]	Line-to-line, rms
전원의 주파수	60[Hz]	-
정상분 전압 크기	150[V]	불평형시
고조파 전압크기	5차 : 9[V] 7차 : 12.6[V] 11차 : 9[V]	THD = 9.93%
제어기 대역폭	300[rad/s]	-
LPF 차단주파수	60[Hz]	기존방법
관측기 오차 특성방정식 극	4300	제안된 방법

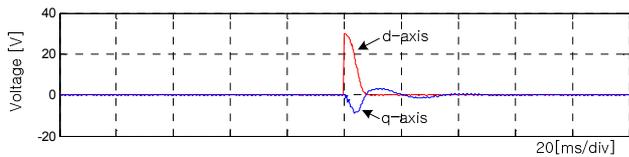
그림 5는 제안된 상태관측기의 기본과 정상분 전압 추정 성능을 확인하기 위한 파형으로, 그림 5 (a)는 그림 3의 v_{dq}^e 에 해당하는, 추정위상각을 기준으로 동기좌표 변환된 맥동성분이 포함된 d-q축 전압이다. 기본과 정상분 전압의 변환치인 직류성분에 역상분과 고조파에 의한 맥동이 포함됨을 확인할 수 있다. 그림 5 (b)는 그림 5 (a)의 전압에서 상태관측기를 이용해 추정한 기본과 정상분 전압의 동기좌표계 d-q축 전압의 파형이다. 추정된 값과 실제 값의 오차는 그림 5 (c)에서 확인할 수 있다.



(a) 왜곡된 동기좌표계 d-q축 전압
(a) Distorted synchronous reference frame d-q voltage

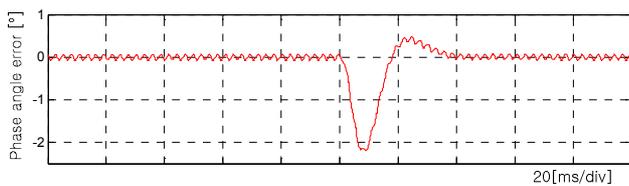


(b) 상태관측기로 추정한 기본파 정상분 d-q 전압
(b) Estimated fundamental positive sequence d-q voltage by state observer

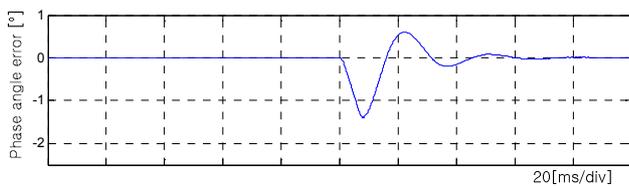


(c) 기본파 정상분 d-q전압 추정오차
(c) Estimation error of fundamental positive sequence d-q voltage

그림 5 전원의 동기좌표계 d-q축 전압
Fig. 5 Synchronous reference frame d-q axis voltage of source



(a) 기존의 방법으로 검출한 위상각의 오차
(a) Phase angle error from conventional method



(b) 제안된 방법으로 검출한 위상각의 오차
(b) Phase angle error from proposed method

그림 6 위상각 오차
Fig. 6 Phase angle error

그림 6은 위상각 오차의 파형이다. 그림 6 (a)는 기존의

정상분 전압 추출 PLL 방법으로 검출한 위상각의 오차로 정상상태에 $\pm 0.05^\circ$ 의 위상각 오차가 남아 있다. 그림 6 (b)는 제안된 상태관측기를 이용한 PLL 방법으로 검출한 위상각의 오차이다. 정상상태에서의 위상각 오차를 측정해 보면 크기가 $\pm 0.005^\circ$ 로 기존 방법 대비 10분의 1 이내로 줄어들었다.

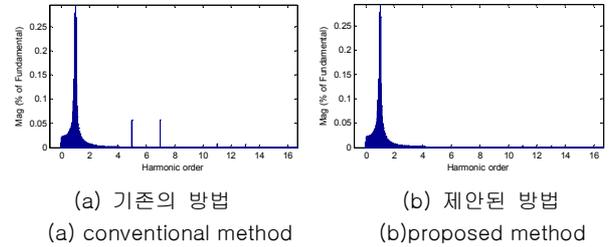


그림 7 검출된 위상각에 의한 정현함수 지령신호의 FFT 결과
Fig. 7 FFT result of sinusoidal reference from detected phase angle

그림 7의 (a), (b)는 각각 기존의 방법과 제안된 방법으로 구한 위상각으로 생성한 정현함수 지령신호의 FFT 결과이다. 기존의 방법으로 검출한 위상각에 의한 정현함수에는 비교적 주파수가 높은 11차 고조파 성분은 제거되나 5, 7차 고조파 성분은 남아있다. 반면 제안된 방법의 경우 5, 7, 11차 성분이 모두 제거됨을 확인할 수 있다. 제안된 방법의 정현함수 총 고조파 외율은 0.01%로 기존 방법의 0.08% 대비 87.5% 감소하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 상태관측기를 이용한 왜곡된 3상 전원의 PLL 방법에 대해 제안하였다. 불평형, 고조파 전압에 의해 왜곡된 3상 전원을 동기좌표계 d-q축 전압으로 변환하고, 상태관측기는 변환된 동기좌표계 d-q축 전압에서 기본과 성분에 해당하는 일정한 d-q축 전압을 추정한다. 이렇게 추정된 기본과 정상분 전압을 동기좌표계 PLL의 입력으로 사용함으로써 왜곡된 전원의 위상각을 정확하게 검출할 수 있다. 5, 7, 11차 고조파 전압이 포함된 불평형한 전원을 대상으로 시뮬레이션을 하였고, 그 결과를 통해 제안된 방법의 위상각 검출 성능이 기존의 정상분 전압 추출 PLL 방법보다 개선됨을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Sang-Joon Lee, "New PLL Method and Voltage Controller of Series Compensator for Voltage Sag Compensation," PH.D Thesis. 2003.
- [2] V. Kaura, V. Blasko, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Condition," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 33, no. 1, pp.58-63, Jan./Feb. 1997.
- [3] 황희훈, 최중우, 김홍근, "전차원 상태 관측기를 이용한 단상 PLL 제어의 특성 연구", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 78-80, 2006. 11.