

계통연계 분산전원을 위한 Phase Lacked loop

김영섭¹⁾, 안교상²⁾, 박 성연³⁾, 임희천⁴⁾, 오제명⁵⁾

Phase Lacked Loop for Grid-Connected Three phase Inverter

Y. S. Kim, K. S. Ahn, S. Y. Park, L. C. Lim, J. M. Oh

Key words : Phase Lacked Loop(위상고정루프), Grid-Connected(계통연계), VSI(전압원인버터), Harmonic(고조파), Unbalance Voltage(전압불평형)

Abstract : Phase Lacked Loop(PLL)은 분산전원을 계통연계시 동기설정을 위해 중요한 장비이다. 이러한 동기설정은 Point of Common Coupling(PCC)에서 계통 전압을 검출하여, 크기와 위상을 동일하게 설정하여 전력변환장치에서 전력을 출력 한다. 일반적으로 PCC에서 계통전압을 검출 하였을 때 고조파, 상간불평형은 전력변환장치 출력 왜곡을 야기 시킨다. 본 논문에서는 이러한 출력왜곡을 감소시키기 위한 3상 PLL을 모델링하여, 그 제어 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서론

분산전원용 전력변환장치에서 계통연계시 계통의 전압의 크기와 위상각 정보는 동기설정 및 제어에 있어 필수적이다.¹⁾ 기존의 산업계에선 3상 전압조건에서의 전원전압의 위상각 검출을 위해 단상PLL(Phase Locked Loop)을 사용하여 가격경쟁을 가진 전력변환장치를 제작하여 왔다.³⁾ 현재 10kW 이상의 계통연계형 분산전원의 전력변환장치는 3상 전압의 출력을 요하고, 계통상황에 유연하게 대처하여 보다 고품질의 전력을 생산하기 위하여 3상 정보를 모두 사용하는 3상 PLL 사용이 분산전원용 전력변환장치에서 필요하다. 3상 전압의 위상각을 검출하는 방식은 동기좌표계상의 PLL 방법이 간단하면서도, 안정적인 위상 검출 방법이지만 계통전압에 왜곡이 있는 경우 검출된 위상각으로부터 합성되는 전압, 전류지령치에 많은 고조파 성분이 포함되게 되는 단점이 있다.²⁾ 이러한 계통전압의 왜곡성분은 많은 고조파 포함되거나, 전압의 상간 불평형이 주를 이룬다. 본 논문에서는 이러한 전압 왜곡성분의 동기좌표계상의 PLL 방법에서의 모델링 및 저역필터를 사용하여 이러한 왜곡을 줄여주는 3상 동기좌표계상의 PLL 방법과 그 성능을 시뮬레이션 하였다.

2. 3상 PLL 시스템

3상 동기좌표계 PLL 방법은 Fig. 1 과 같이 표현된다.

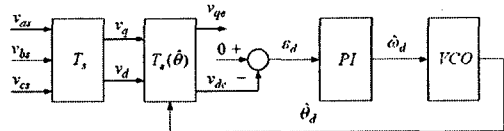


Fig. 1 Block diagram of three phase PLL system

계통전압이 각주파수 ω 를 가진 평형 3상 정현파 전압이라며, a상 전압을 기준각으로하여 3상전원 전압을 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

-
- 1) 한전 전력연구원 신기술센터
E-mail : yskim@kepri.re.kr
Tel : (042)865-7546 Fax : (042)865-5489
 - 2) 한전 전력연구원 신기술센터
E-mail : ksahn@kepri.re.kr
 - 3) 한전 전력연구원 신기술센터
E-mail : sybark@kepri.re.kr
 - 4) 한전 전력연구원 신기술센터
E-mail : fclim@kepri.re.kr
 - 5) 한전 전력연구원 신기술센터
E-mail : ohjm@kepri.re.kr

$$v_{abc} = V_m \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $v_{abc} = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T$. V_m 은 상전압의 최고치이다. 그러므로 계통 전압은 $q-jd$ 정지좌표계로 식(2)와 같이 좌표 변환된다.

$$v_{qd} = T_s \cdot v_{abc} \quad (2)$$

여기서 T_s 정지좌표계 변환 행렬로 식(3)과 같다.

$$T_s = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

유사하게, 동기좌표계로 변환식은 아래와 같이 표현 된다.

$$v_{qde} = T_e(\hat{\theta}) \cdot v_{qd} \quad (4)$$

$$T_e(\hat{\theta}) = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 $T_e(\hat{\theta})$ 는 동기좌표 변환 행렬이며 $\hat{\theta}$ 는 PLL 출력 되는 위상각이다. 계통전압의 동기좌표변환을 하면 된 d 축 전압 v_{de} 는 식(6),(7)과 같이 표현된다.

$$v_{de} = E_m \sin \delta \quad (6)$$

$$= \varepsilon_d \quad (7)$$

$E_m = -V_m$ 이며, 위상각 차 $\delta = \theta - \hat{\theta}$ 이다. δ 가 아주 작은 값이면 식(8)으로 유도된다.

$$\varepsilon_d \cong E_m \delta \quad (8)$$

여기서, PLL 주파수 $\hat{\omega}$ 는 다음 식(9)와 같다.

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} = K_{PI} \cdot \varepsilon_d \quad (9)$$

$$\varepsilon_d \cong E_m \delta \quad (10)$$

K_{PI} 는 PI 제어기 이득 값이다.

계통 전압 조건이 삼상 평형인 경우에 대하여 다음과 같은 특성을 나타낸다. Fig. 2 는 PLL의 출력 각 주파수로 빠른 동특성으로 계통 주파수에 추종한다.

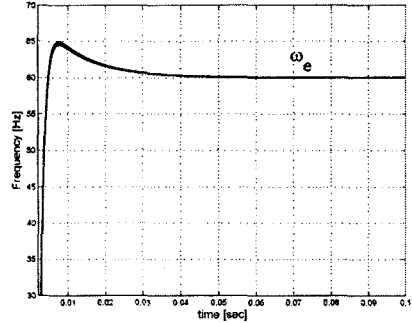


Fig. 2 왜란이 없는 경우의 PLL 추종 각주파수

3. 전압 왜란 성분

실제 계통전압은 고조파 성분이 포함되고, 어느 정도 불평형이 존재하게 된다. 비선형 부하의 증가와 분산전원 도입 용량에 증가에 따라 배전선로에 이러한 왜란이 증가하게 될 것이다.

3.1 상불평형

상간 전압크기의 불평형은 단상부하 간의 불일치에 기인하며, 배전계통에서는 변전소에서 탭 변환 변압기를 사용하여 상간 평형을 이루게 하나, 단상부하의 변동에 연속적으로 응답하지 않으므로, 분산전원의 운영에 있어서 적절한 대책이 필요하다. 전압 a, b 를 측정하여 3상 전압값을 측정하였다고, 가정하고, a 상 전압이 a 배만큼 상불평을 되면 3상 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{as} = a \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$v_{bs} = \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (12)$$

$$v_{cs} = -(v_{as} + v_{bs}) \quad (13)$$

이때, 상전압을 정지좌표변환 하면 다음과 같다.

$$v_q = a \cos(\omega t) \quad (14)$$

$$v_d = \frac{(1-a)}{\sqrt{3}} \cos(\omega t) - \sin(\omega t) \quad (15)$$

$$\overline{V} = v_q - jv_d \quad (16)$$

벡터 형태의 표현은 다음과 같다.

$$\overline{V} = \overline{V}_+ e^{+j\omega t} + \overline{V}_- e^{-j\omega t} = \overline{V}_P + \overline{V}_N \quad (17)$$

단,

$$\overline{V}_+ = \frac{(1+a)}{2} - j \frac{(1-a)}{2\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$\overline{V}_- = -\frac{(1-a)}{2} - j \frac{(1-a)}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

여기서, \overline{V}_P , \overline{V}_N 은 전압벡터의 정상분, 역상분이다. 동기좌표계로 변환 하면, 식(20), (21)과 같다.

$$\overline{V}_{+1}^e = \overline{V}_+ e^{-j\omega t} = \overline{V}_+ + \overline{V}_- e^{-j2\omega t} \quad (20)$$

$$\overline{V}_{-1}^e = \overline{V}_- e^{+j\omega t} = \overline{V}_+ e^{+j2\omega t} + \overline{V}_- \quad (21)$$

\overline{V}_{+1}^e , \overline{V}_{-1}^e 와 같이 정상분 전압 과 역상분 전압의 합성이 \overline{V} 를 이루게 되며 2ω 주파수의 왜란 성분이 포함 되어 \overline{V}_{+1}^e 성분만 벡터도 상에 표현하면, Fig. 3 와 같이 3차원 공간상으로 왜곡되어 표현된다.

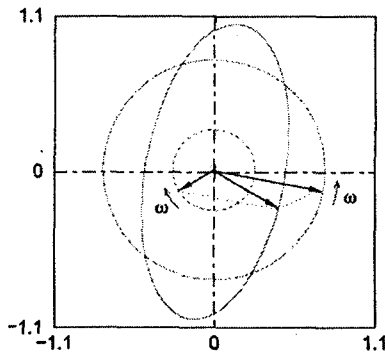


Fig. 3 상간불평형 조건에서의 \overline{V} 벡터 왜곡

3.2 전압 고조파

계통전압의 고조파는 주로 저차 고조파가 의한 경우가 많다. 3차고조파 전압의 경우 ∇/Y 변압기에 의해 차단되므로 전파되지 않는 것으로 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$v_{as} = v_1 \cos \theta + v_5 \cos 5\theta + v_7 \cos 7\theta + \dots \quad (22)$$

$$v_{bs} = v_1 \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_5 \cos 5(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$+ v_7 \cos 7(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \dots \quad (23)$$

$$v_{cs} = v_1 \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) + v_5 \cos 5(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

$$+ v_7 \cos 7(\theta + \frac{2\pi}{3}) + \dots \quad (24)$$

식(3)의 방법으로 통해 정지좌표계로 변환 하면 다음과 같다.

$$v_q = v_1 \cos \theta + v_5 \cos 5\theta + v_7 \cos 7\theta + \dots \quad (25)$$

$$v_d = -v_1 \sin \theta + v_5 \cos 5\theta - v_7 \cos 7\theta + \dots \quad (26)$$

식(4)의 방법을 통하여 동기좌표계로 변환 된다.

$$\begin{aligned} v_{de} &= -v_1 \sin \delta + v_5 \sin(\delta + 5\theta) + v_7 \cos 7\theta + \\ &\cong -v_1 \delta + (v_5 - v_7) \sin 6\theta + (v_{11} - v_{13}) \sin 12\theta \\ &\quad + \dots \quad (28) \end{aligned}$$

$$\delta = E_{M6} \sin 6\theta + E_{M12} \sin 12\theta + \dots \quad (29)$$

단,

$$E_{M6} = \frac{V_5 - V_7}{V_1} \quad (30)$$

$$E_{M12} = \frac{V_{11} - V_{13}}{V_1} \quad (31)$$

v_{de} 에 계통 전압에 6ω , 12ω , ... 주파수의 고조파성분이 포함된다.

3.3 페루프 시스템

동기좌표계 PLL 방법 시스템의 라플라스 변환에 의한 페루프 시스템은 Fig. 4 와 같이 선형화 된다.

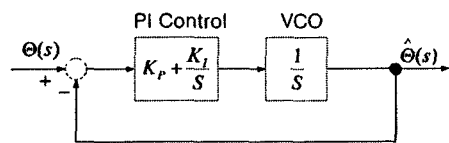


Fig. 4 PLL 시스템 모델

동기 좌표계 PLL 방법의 페루프 시스템 특성상 전압고조파의 경우 PI 제어기가 필터 역할을 하여 제거 가능하지만, 상불평형 성분이 포함된 경우 시스템이 응답특성이 나빠지거나, 시스템이 불안정화 된다. 이에 v_{de} 성분내 간단히 저역필터를 추가하여 식(20), 식(21)에서 2ω 의 주파수로 주입되는 상간불평형에 의한 왜란을 제거 하여 \overline{V}_+ , \overline{V}_- 성분만을 루프에 케한 Fig. 5 시스템을 구성하였다.

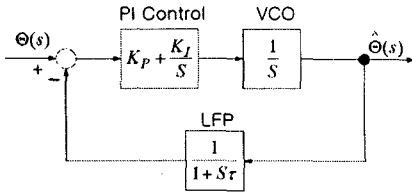


Fig. 5 왜란 제거를 위한 PLL 모델

동기좌표 PLL 방법의 시스템에서 페루프 전달함수는 식(32) 과 같고, 저역필터(Low Pass Filter)를 추가한 시스템의 전달함수는 식(33)으로 표현된다.

$$C_{PLL}(s) = \frac{F(s)}{1 + F(s)} \quad (32)$$

$$C_{LPF}(s) = \frac{F(s)}{1 + F(s)L(s)} \quad (33)$$

여기서,

$$F(s) = \frac{K_P s + K_I}{s^2} \quad (34)$$

$$L(s) = \frac{1}{s\tau + 1} \quad (35)$$

4. 실험

왜곡된 계통 전압의 PLL의 성능 테스트를 위해 계통전압을 표1 과 같이 프로그램 하였다.

v_{as} 전압이 0.8[p.u.], 5고조파 9[%]와 7고조파 1[%]가 함유된 전압으로 고조파와 상불평형이 함께 포함된 형태로 Fig. 6 과 같이 프로그램 하였다.

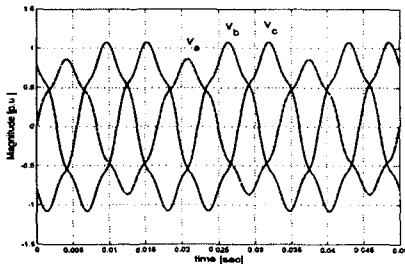


Fig. 6 고조파 와 상불평형 조건의 계통전압

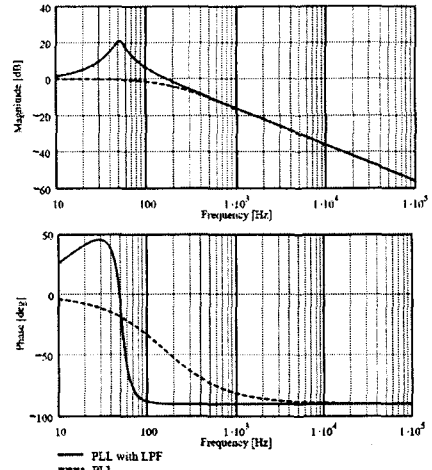


Fig. 7 저역필터를 가감에 따른 보데선도

이상의 시스템에서 $K_P=1000$, $K_I=12000$, $\tau=0.0091[rad/s]$ 로 두고 저역필터의 가감에 따른 PLL의 주파수응답 특성을 Fig. 7에서 보았다. Fig. 8 는 a상에 크기를 α (불평형지수)를 주어 상불평형에 따른 PLL 동태 성능을 보았다. 0.08초 이내에 60[Hz]의 계통주파수에 수렴 하였으나, 1~2[Hz]의 진동을 포함 하는 특성을 보였다.

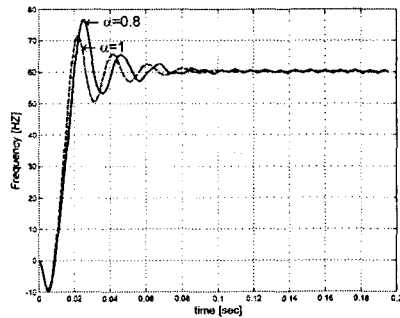


Fig. 8 불평형지수 α 에 따른 주파수 추종

4. 결 론

동기좌표 PLL 방법은 3상 PLL 방식중 간단히 구현가능하지만, 특히 상불평형 성분이 포함될 경우 저역필터를 간단히 추가하여 시스템을 구성하였다. 이는 시스템 차수의 증가로 시스템은 복잡해 지나, 전압 벡터의 정상분, 역상분 성분을 따로 추출하지 않고도, v_{de} 값의 필터링 만으로 간단하게 상불평형 및 고조파 성분을 줄이는 특성을 보였다.

이 논문은 전력기반조성사업기금 지원 "120kW급 태양광 발전시스템의 실계통 연계운전 적용및 평가" 과제의 연구비 지원에 의한 것입니다.

References

- [1] Sang-Joon Lee, "New PLL Method and Voltage Controller of Series Compensator for Voltage Sag Compensation," *Ph.D Thesis*, 2003.
- [2] Se-Kyo Chung, "A phase tracking system for three phase utility interface inverters," *IEEE Tran. Power Electronics*, Vol. 15, pp. 431-438, May 2000.
- [3] V. Blasko, J. C. Moreira, and T. A.Lipo, "A new field oriented controller utilizing spatial position measurement of rotor end ring current," in *Proc. PESC*, 1989, pp. 295-299.