

# 불평형 전원조건하의 재귀형 최소자승법을 이용한 향상된 SRF-PLL

문석환, 김지원, 박병건, 김종무, 이기창, 하현욱, 이정욱, 박병우  
한국전기연구원

## Improved SRF-PLL using Recursive Least square Method under Unbalanced Grid Condition

Seok Hwan Moon, Ji won Kim, Byoung Gun Park, Jong Mu Kim, Ki chang Lee,  
Hyung Uk Ha, Jung Uk Lee, Byeong Woo Park  
Korea Electrotechnology Research Institute

### ABSTRACT

기존의 SRF PLL방법은 구현이 간단하고 정상전원에서 위상각 추정 성능이 우수하지만 불평형 전원하에서 위상각 추정 성능이 저하된다. 본논문에서는 상간전압의 위상변화, 상전압의 크기변동 및 오프셋이 발생된 불평형 전원하에서 변동된 값들을 실시간으로 보상하여 위상각을 검출하는 재귀형 최소 자승법을 이용한 SRF PLL방법을 제안한다.

### 1. 서론

풍력발전이나 조류발전 등의 신재생에너지 시스템에서 계통 연계를 위해 전원단 전압의 위상각을 검출하는 것은 매우 중요하다<sup>[1]</sup>. 기존의 SRF PLL방법은 이상적인 전원조건하에서는 위상각 추정 성능이 우수하지만 전원단 전압이 불평형이 되었을 경우 전원 주파수의 2배의 맥동전압이 발생하여 위상각 추정 성능이 저하되는 단점이 있다.

본 논문에서는 불평형 전원하에서도 정확하게 전원단 전압의 위상각을 검출할 수 있는 재귀형 최소자승법을 이용한 SRF PLL방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 기존의 SRF PLL과 비교하여 위상각 검출성능이 우수한 것을 확인하였다.

### 2. 기존의 SRF-PLL

동기 좌표계를 이용한 SRF PLL은 그림 1과 같은 구조를 가진다. 그림 1에서 보는 바와 같이 3상 전압을 동기좌표계로 변환하여 PI제어기로 d축 전압을 0으로 제어함으로써 전압전압의 위상각을 검출한다.

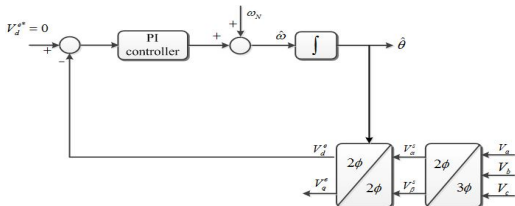


그림 1 SRF-PLL의 블록도  
Fig. 1 Block diagram of SRF-PLL

### 3. 재귀형 최소자승법을 이용한 SRF-PLL

3상 전원이 이상적인 경우 정지좌표계의 전압으로 변환하면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{\alpha}^s &= A \sin(\theta) \\ V_{\beta}^s &= A \cos(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\theta$ 는 실제 위상각이고,  $A$ 는 상전압 최대치이다. 3상 전원이 크기, 오프셋 및 위상에 오차가 발생하여 불평형이 될 경우, Heydermann이 제안한 방법을 이용하여 오차를 고려한 정지좌표계의 전압과 보상된 이상적인 신호를 각각 식 (2)와 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{\alpha p}^s &= V_{\alpha}^s + f_a \\ V_{\beta p}^s &= \frac{A_a \cos(\theta - \alpha)}{G} + f_b \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{\alpha c}^s &= \frac{(V_{\alpha p}^s - f_a)}{A_a} \\ V_{\beta c}^s &= \frac{(V_{\alpha p}^s - f_a) \sin \alpha + G(V_{\beta p}^s - f_b)}{A_a \cos \alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $f_a$ 와  $f_b$ 는 각각 정지좌표계  $\alpha$   $\beta$ 전압의 오프셋을 나타내고  $\alpha$ 는 두 전압간의 위상 오차를 나타낸다. 식(3)은 삼각함수의 제곱공식을 이용하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$k_1 V_{\alpha p}^{s^2} + k_2 V_{\beta p}^{s^2} + k_3 V_{\alpha p}^s V_{\beta p}^s + k_4 V_{\alpha p}^s + k_5 V_{\beta p}^s = 1 \quad (4)$$

$k_1$ 에서  $k_5$ 값은 재귀형 최소 자승법에 의해 추정이 가능하고,  $k_1$ 에서  $k_5$ 와  $\alpha$ ,  $G$ ,  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $A_a$ 의 관계식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{k_3}{\sqrt{4k_1k_2}}\right)$$

$$G = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}$$

$$f_a = \frac{2k_2k_4 - k_3k_5}{k_3^2 - 4k_1k_2}$$

$$f_b = \frac{2k_1k_5 - k_3k_4}{k_3^2 - 4k_1k_2}$$

$$A_a = \frac{\sqrt{4k_2(1 + k_1f_a^2 + k_2f_b^2 + k_3f_af_b)}}{4k_1k_2 - k}$$

재귀형 최소자승법을 이용하여 3상전원이 크기, 오프셋 및 위상에 오차가 발생된 불평형 전원을 이상적인 전원으로 복원한 후 SRF PLL을 적용하면 좀 더 정확한 위상각 검출이 가능하다. 그림 2는 재귀형 최소 자승법을 이용한 SRF PLL의 전체 블록도이다.

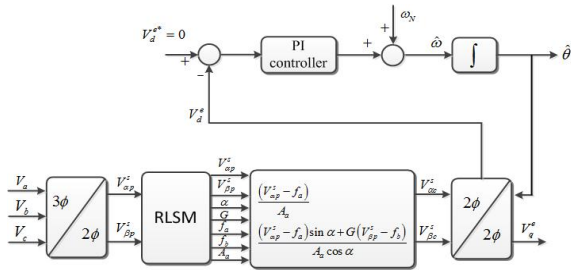


그림 2 재귀형 최소자승법을 이용한 SRF-PLL의 블록도  
Fig 2 Block diagram of SRF-PLL using recursive least square method

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3은 시뮬레이션 및 실험을 위해 모의된 크기, 오프셋 및 위상에 오차가 존재하는 3상 전원전압을 나타내었다.

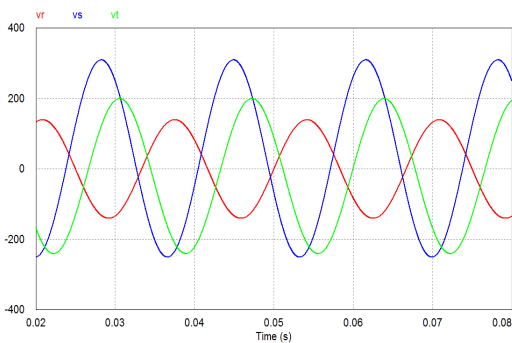
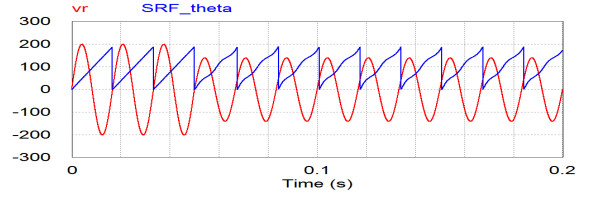
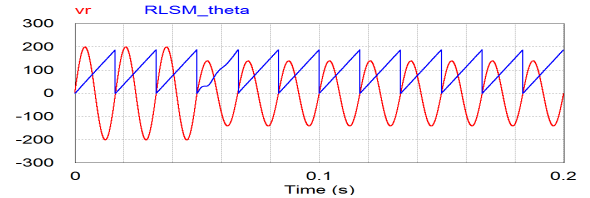


그림 3 모의된 3상 전원전압  
Fig 3 Simulated 3 phase grid voltage

그림 4와 그림 5는 SRF PLL 및 재귀형 최소자승법을 이용한 SRF PLL의 시뮬레이션 및 실험 결과를 나타내었다.

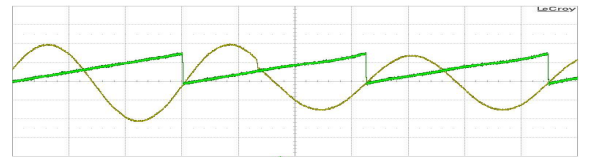


(a) SRF-PLL

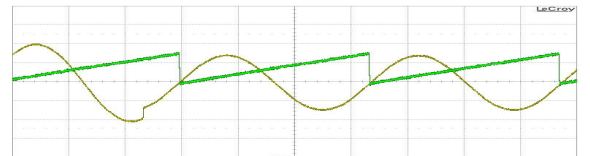


(b) 재귀형 최소자승법을 이용한 SRF-PLL

그림 4 시뮬레이션 결과  
Fig 4 Simulation results



(a) SRF-PLL



(b) 실험 결과

그림 5 실험 결과  
Fig 5 Experimental results

#### 5. 결론

본 논문에서는 3상 전원전압에 크기, 오프셋 및 위상 오차가 존재하는 경우에도 정확하게 전원 전압의 위상을 검출할 수 있는 PLL기법을 제안하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

이 논문은 국토해양부 소관 연구개발사업인 능동제어형 조류발전 기술개발(20110171)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] Yazdani, D., Bakhshai, A., Joos, G., Mojiri, M. "A nonlinear adaptive synchronization technique for grid connected distributed energy sources", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 23, no. 4, pp. 2181-2186, July, 2008.
- [2] P. L. M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," Appl. Opt., Vol. 20, no. 19, Oct. 1981.