

그리드 동기형 PLL의 위상오차 개선

이 치 환
위덕대학교 전자공학과

Improvement of PLL Phase Error for Grid Synchronization

Chi Hwan Lee
Dept. of Electronic Eng., Uiduk Univ.

Abstract

그리드 연계 인버터의 주파수 위상 동기를 위해 사용하는 SRF PLL의 입력함수를 V_q 및 V_d 전압을 복합적으로 사용하여 응답특성을 개선시켰다. 기존의 SRF PLL에서 V_q 만을 이용한 구조는 위상범위 $[-\pi/2, \pi/2]$ 에서만 선형 동작이 가능하지만, 제안된 구조는 2π 영역 모두에서 선형 동작이 가능토록 하였다. 시뮬레이션으로 위상차 π 에서 기존 SRF PLL의 부동작을 확인하고 제안된 방법의 속응성을 보였다.

1. 서론

대체 에너지의 이용에 대한 여러 형태의 기술개발과 적용 방법이 연구 주제로 오랫동안 지속되고 있다. 대부분은 전기에너지의 생성에 관련되고 그리드 연계운전이 사용되고 있다. 그리드 연계운전에서 주파수와 위상을 정확하게 추종하는 것이 전력 품질을 결정하는 중요한 인수이다. Phase locked loop(PLL)은 모든 주파수 제어에 사용되는 일반적 방법으로, 기준신호와 제어신호의 위상을 비교하여 일치하도록 발진 주파수를 제어하는 형태이다. PLL에서 추종 성능을 결정하는 PI제어기는 제어 루프의 해석으로 쉽게 결정 될 수 있다. 그리드 연계에서는 주파수의 정확성 및 위상의 순시적 변동을 억제하여, 발생하는 제어 주파수의 위상잡음을 낮게 유지하여야 한다. 빠른 응답을 위해 사용하는 synchronous reference frame(SRF) PLL은 성능 개선을 위한 많은 변형 구조를 가진다.

빠른 응답은 PI제어기를 빠르게 설정하면 가능하지만, 계통 전압이 많이 왜곡된 정현파 일 경우, 큰 위상잡음을 유발시킨다. 그리드 전압을 LPF를 사용하여 고조파를 억제시키는 경우도 있으나 시간지연과 위상지연의 단점이 있다. SRF PLL에서 전체 제어기를 단순화하기 위해 d-q 전압에서 q축 전압을 이용한다. 그리드와 위상동기 된 경우 q축 전압이 0이 되는 특성을 이용하지만, 위상오차의 선형성이 주어지지 않는다. 이것은 0도 부근에서는

선형화를 통해 설정된 PI제어기가 적절하게 동작하지만 큰 위상오차의 경우 요구되는 응답 특성이 얻어지지 못한다.

본 연구는 SRF PLL에서 q축 전압에 d축 전압을 부가하여 위상오차 항을 선형화시키고 빠른 응답을 가능케 하는 방법을 제시하였다. PI제어기의 이득을 낮게 유지하면서, 위상오차 180도 부근에서의 부동작 영역을 제거하고 전체 시스템의 위상추적 안정성이 증가하였다.

2. PLL

그리드 전압을 고정좌표계 dqs에서 동기좌표계 dq로 변환하면 고정된 d-q축 전압을 얻을 수 있다. SRF PLL 위상오차를 검출하기 위해 그리드 전압을 d축에 일치시키고 영을 기준으로 위상오차에 반응하는 q축 전압을 이용한다.

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} \quad (1)$$

V_{qs} 를 위상 기준 신호로 설정하면, V_d 는 위상 동기점에서 입력 정현파의 최대치를 유지하고 V_q 는 영으로 나타난다. 삼상전원에서는 dq변환이 직접 이루어질 수 있으나, 단상전원은 90도 지연된 V_{ds} 전압을 생성하고 변환시킨다.

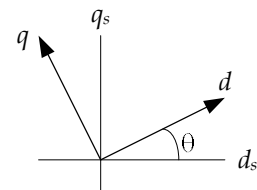
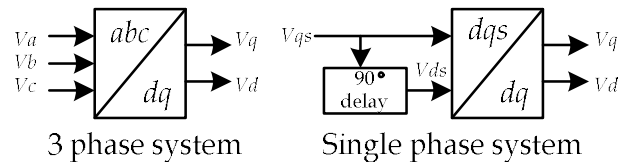


Fig. 1 Stationary and rotating dq axes

PLL 제어기의 입력으로 사용되는 위상오차 신호는 V_q 이며 위상에 따른 변화는 그림 2와 같다. SRF PLL에서 위상오차 $\theta_q - \theta_{PLL}$ 는 V_q 이므로, 오차범위 $\pm\pi/2$ 에서는 선형적이지만 π 에 가까이 가면 오차가 작아지는 현상이 발생한다. 이상적일 경우, 위상오차는 직선의 함수로 나타나야 하며 V_q 만을 이용하면 위상이 π 일 때 동기에 실패하게 된다.

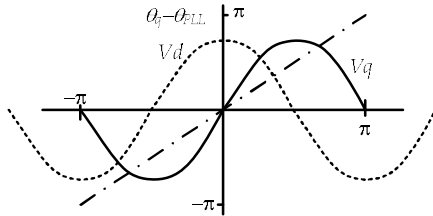


Fig. 2 Relationship phase error, V_q and V_d

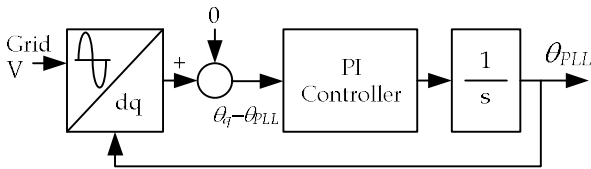


Fig. 3 SRF PLL system

SRF PLL 시스템은 위상 오차를 영으로 유지하기 위한 피드백 제어이며 PI 제어기에서 출력주파수를 결정하고 적분기를 통해 회전각 θ_{PLL} 을 생성한다. PLL의 응답시간은 PI 제어기의 계수로 결정되므로 빠른 응답이 가능하다. 그러나 입력의 그리드 전원이 많은 고조파를 가지고 있으므로 V_q 가 순시적으로 변하는 특성이 있다. 빠른 응답에서는 큰 위상잡음이 발생하며 불안정한 회전각 θ_{PLL} 이 얻어진다. 느린 응답은 상대적으로 안정된 회전각 θ_{PLL} 이 얻어진다.

V_q 만을 이용한 PLL에서는 안정 동작 영역이 제한되므로 V_d 를 추가하여 그림 4와 같이 위상 오차 $\theta_q - \theta_{PLL}$ 를 수정한다. V_d 신호가 (-)부호를 가질 때만 V_q 의 부호와 일치시켜 합의 신호를 만들면 안정동작 영역이 확대된다.

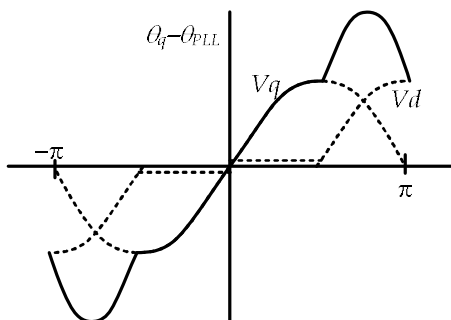
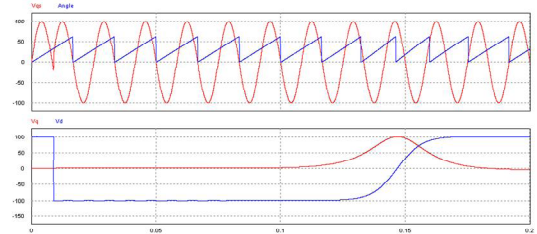


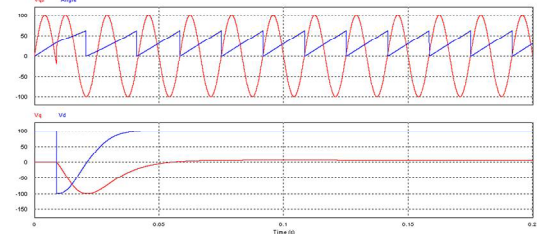
Fig. 4 Modified function of phase error

3. 시뮬레이션

응답특성을 비교하기 위해 PI제어기는 계수를 고정하고 PSIM으로 결과를 확인하였다. 그림 5-a)는 기존 SRF PLL에서 위상차 180도 부근에서의 응답특성이다. 초기에는 위상 오차값이 작아 매우 느린 반응으로 나타난다. 그림 5-b)는 제안된 PLL의 응답으로 매우 빠르게 동기 됨을 볼 수 있다.



a) SRF PLL



B) proposed SRF PLL

Fig. 5 Responses at 180 deg changed

4. 결론

그리드 연계 운전을 위한 PLL에서 새로운 입력 함수를 설정하여 모든 동작 영역에서 PLL 제어기의 선형성을 확보하였다. SRF PLL에서 q축 전압을 이용한 구조는 위상오차에 대해 V_q 가 정현파의 형태로 나타나며 위상 $[-\pi/2, \pi/2]$ 범위에서만 선형화가 된다. 제안된 방법은 V_d 전압을 V_q 의 극성에 따라 구간 $[-\pi, -\pi/2]$, $[\pi/2, \pi]$ 에서 부가하여 위상오차 함수를 개선하였다

Reference

- [1] T. Ostrem, W. Sulkowski, L. E. Norum, and C. Wang, "Grid Connected Photovoltaic (PV) Inverter with Robust Phase-Locked Loop (PLL)", IEEE PES Transmission and Distribution Conference, 2006.
- [2] Se-Kyo Chung, "Phase-locked loop for grid-connected three phase power generation systems", Journal of EEIS, Vol.4, No.6, 1999.
- [3] T. Ostrem, W. Sulkowski, L. E. Norum, and C. Wang, "Grid Connected Photovoltaic (PV) Inverter with Robust Phase-Locked Loop (PLL)", IEEE PES Transmission and Distribution Conference, 2006.