

# FFT를 이용한 위상추종 방법

류강열, 민병덕\*, 이종필\*, 김태진\*, 유동욱\*, 송의호  
 창원대학교 제어계측공학과, 한국전기연구원\*

## Method of PLL(phase locked loop) using FFT

Ryu Kang Ryul, Byung Duk Min\*, Jong Pil Lee\*, Tae Jin Kim\*, Dong Wook Yoo\*, Eui Ho Song  
 Dept. of Control and Instrumentation Eng. Changwon National University,  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 새로운 FFT에 의한 계통위상 추정 알고리즘을 제안한다. 신재생 에너지 분야에 적용되는 계통연계형 인버터에서는 계통과 동기를 위해서는 반드시 계통의 위상 정보가 필요하다. 일반적으로 사용하는 3상 D-Q 변환에 의한 위상 추종과 달리 새롭게 제안하는 FFT를 사용하는 알고리즘은 개인 튜닝 부분이 없으며 FFT의 특성상 기본주파수 이외의 성분을 제외한 강력한 노이즈 제거효과로 인해 직접적이며 노이즈에 강한 특징을 가지고 있다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 성능이 만족할 만한 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

### 1. 서 론

1차 2차 석유파동과 근래의 유가 폭등으로 인하여 신재생에너지 부분에 각광 받으면서 전력변환 장치의 계통연계 운전에 대한 연구가 활발히 전개 되고 있다. 계통연계 운전을 하기 위해서는 반드시 계통의 위상정보를 정확히 측정하여 계통의 주파수와 위상이 동일 한 상태로 전류를 공급하여야 한다. 그러기 위해서는 위상추종 알고리즘이 필요하다. 일반적인 위상추종은 3상 D-Q 변환을 통하여 위상정보를 얻는데 3상이 센서나 부하의 영향으로 불평형 상태가 된다. D\_Q 변환된 전압의 성분에 리플이 상당히 섞여 있어 제어를 안정적으로 튜닝하는데 어려움이 있다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위해 지금까지 다른 사용되지 않은 새로운 FFT 방법에 의한 계통위상 추정 알고리즘으로 일반적인 마이크로프로세서를 이용하여 시간적인 문제 없이 FFT 할 수 있는 방법과 이를 이용하여 계통의 위상을 번거로운 개인 튜닝 과정 없이 직접적으로 얻는 방법을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해서 우수성을 검증한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 3상 D-Q변환을 이용한 위상 검출 방법

일반적인 3상 PLL(phase-locked loop)의 구조는 d축의 전압을 0으로 만들어 제어하는 방법으로 위상을 추정하는 형태를 사용하고 있다. 이 경우 그림 1과 같이 PI제어기가 들어가게 되므로 인해 최적의 개인을 튜닝하는 문제가 있으며 이로 인해 위상을 추종할 수 있는 범위가 존재하게 되어 모든 신호의 모

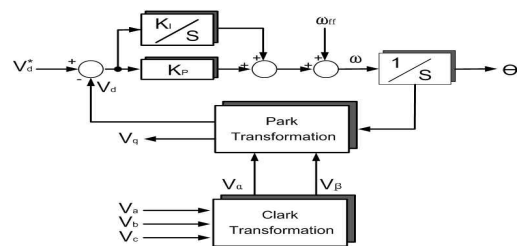


그림 1 일반적인 3상 PLL 구조  
 Fig. 1 General three phase PLL structure

든 영역에 대해서 추종하는 것은 불가능하다. 따라서 PLL이 동작할 수 있는 영역과 추종 속도에 한계가 있다.

#### 2.2 주파수 추출 방법

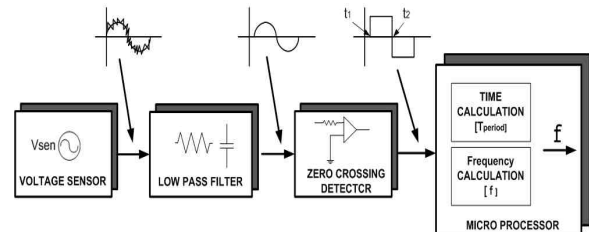


그림 2 주파수 측정 방법  
 Fig.2 Frequency measurement method

본 논문에서 사용된 주파수 추출 방법은 그림 2와 같으며, 입력 전원 신호는 RC 저역 필터를 통하여 충분히 기본파 이외의 노이즈 성분을 감쇄시킨다. 이 신호를 영 전압 센싱회로의 입력으로 사용하면 구형파가 얻어지며 이 신호를 마이크로프로세서를 입력하여 펄스폭의 시간을 정확하게 측정하여 주파수를 계산 할 수 있다. 영 전압 센싱회로의 출력에 나오는 구형파 신호의 상승시간 ( $t_1$ )과 하강시간( $t_2$ )를 이용하여 다음과 같이 주기( $T_{period}$ )를 구할 수가 있다.

$$T_{period} = 2(t_2 - t_1) \quad (1)$$

주파수는 주기의 역이므로 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$f = \frac{1}{T_{period}} \quad (2)$$

이 주파수를 이용하여 기준파형의 위상을 구할 수 있으며 위상 정보를 이용하여 코사인 및 사인 기준 신호를 만들 수 있다.

### 2.3 기본파 추출 FFT 알고리즘

계통 전압은 다양한 부하가 존재함으로 인해 고조파 성분이 많이 포함되어 있다. 기본파에 동기 시키는 것이 계통 연계형 태양광 발전장치의 목적이므로 고조파 성분 및 노이즈 성분을 제거한 기본파 성분을 추출하는 것이 필요하다. 계통 전압신호는 기본 주파수 + 3고조파 성분 + 5고조파 성분 + 7고조파 성분 + ... 즉 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{GRID}(t) = V_m \cos(\omega t + \alpha) + \sum_{n=2}^{\infty} V_{mn} \cos(n\omega t + \alpha) + \sum_{n=2}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \alpha) \quad (3)$$

$V_{GRID}(t)$  : 계통 전압,  $\alpha$  : 위상,  $\omega$  : 계통의 각 주파수( $2\pi f$ )  
 $V_m$  : 기본파 성분의 크기,  $V_{mn}$  :  $n$  차 고조파 성분의 크기

계통전압 신호와 일치시키기 위해서는 기준 신호와의 위상차인  $\alpha$ 를 기존의 복잡한 FFT방법이 아닌 쉽고 빠른 새로운 FFT 방법을 이용하여 구해낸다. 앞 절에서 주파수를 측정하는 방법을 이용하여 주파수를 구하고 코사인 과 사인 기준신호를 다음과 같이 발생시킨다.

$$V_{REFCOS}(t) = \cos(\omega t), V_{REFSIN}(t) = \sin(\omega t) \quad (4)$$

두 기준신호를 각각 위상을 구하고자 하는 입력 전원신호  $V_{GRID}(t)$ 에 곱하면 다음과 같다.

$$V_{GRIDC}(t) = V_{GRID} \times V_{REFCOS}(t) = (V_m \cos(\omega t + \alpha) + \text{harmonics}) \times \cos(\omega t) = \left( \frac{V_m \cos(\alpha) + V_m \cos(2\omega t + \alpha)}{2} \right) + \text{harmonics} \times \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$V_{GRIDS}(t) = V_{GRID} \times V_{REFSIN}(t) = (V_m \cos(\omega t + \alpha) + \text{harmonics}) \times \sin(\omega t) = \left( \frac{V_m \sin(2\omega t + \alpha) - V_m \sin(\alpha)}{2} \right) + \text{harmonics} \times \sin(\omega t) \quad (6)$$

식(5),(6)을 보면 정현파 신호와 직류성분( $\cos(\alpha)$ ,  $\sin(\alpha)$ )으로 구성되어 있다. 정현파 신호는 기본파의 2배 이상의 주파수 성분을 가진 신호로 구성이 되어 있다. 이는 2배의 주파수 주기 동안 평균을 하면 정현파 성분은 모두 한주기 평균은 0이므로 직류성분만 얻을 수 있다. 한주기 동안 평균하면 다음과 같이 위상차  $\alpha$ 에 대한 코사인 성분과 사인 성분만 남게 된다.

$$V_{\cos\alpha} = \frac{2}{T_{\text{period}}} \int_0^{T_{\text{period}}/2} V_{GRIDC}(t) dt = \frac{V_m}{2} \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$V_{\sin\alpha} = \frac{2}{T_{\text{period}}} \int_0^{T_{\text{period}}/2} V_{GRIDS}(t) dt = \frac{V_m}{2} \sin(\alpha)$$

위의 두 성분으로부터 계통전원 전압의 파형 크기  $V_m$  및 위상차  $\alpha$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_m = 2\sqrt{V_{\cos\alpha}^2 + V_{\sin\alpha}^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_{\sin\alpha}}{V_{\cos\alpha}}\right) \quad (9)$$

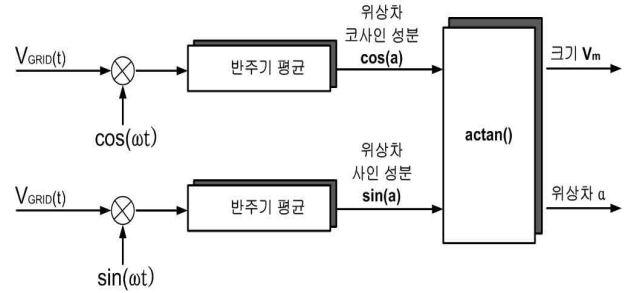


그림 3 크기와 위상차를 구하는 개념도  
 Fig. 3 diagram of Calculating magnitude and phase difference

반주기 동안의 평균이 필요하므로 반주기 마다 값을 얻을 수 있으므로 데이터의 갱신주기가 길어 제어에 이용하는데 문제가 될 수 있다. 이를 극복하기 위하여 아래와 같은 링버퍼를 사용하여 항상 현재 시점에서 반주기 동안의 데이터를 저장하고 있다면 인터럽트 주기 마다 위상정보 및 크기 정보를 얻을 수 있어 제어주기를 제어기의 최대 빠르기 인터럽트 주기로 가져갈 수 있는 장점이 있다.

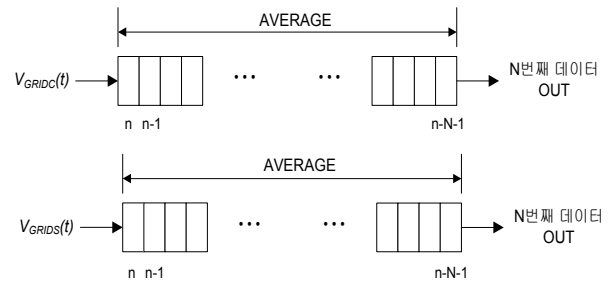


그림 4 버퍼를 이용한 연속 평균방법  
 Fig.4 Serial average method to using buffer

$$SC_n = SC_{n-1} + DATAC_n - DATAC_{n-N} \quad (10)$$

$$V_{\cos\alpha} = \frac{2}{N} SC_n$$

$$SC_n = SC_{n-1} + DATAC_n - DATAC_{n-N} \quad (11)$$

$$V_{\sin\alpha} = \frac{2}{N} SS_n$$

$n$  : 현재 인터럽트 시점점자,  $n-1$  : 이전 인터럽트 시점  
 $N$  : 버퍼의 총 개수,  $SC$  : cosine 성분버퍼의 합,  
 $SS$  : sine 성분의 버퍼의 합

계산량을 살펴보면 곱셈  $\times 2$ , 덧셈  $\times 2$ , 뺄셈  $\times 2$ , square root  $\times 1$ , arctan  $\times 1$  으로 기본파 신호의 크기와 위상차를 구할 수 있다. 반주기 평균을 위해서 버퍼가 반주기 동안의 데이터를 저장할 수 있는 양이 필요하나 큰 양이 아니다. 예로 100us의 인터럽트 주기를 가진다고 했을 때 계통주파수가 60Hz이므로 166개의 버퍼만 필요하다. 따라서 위의 알고리즘을 통해 얻은  $\alpha$ 를 더하면 계통의 전압신호 위상과 정확히 일치하는 위상을 구할 수 있다. 계통전원 전압의 위상은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{계통전원 전압의 위상} = \omega t + \alpha \quad (12)$$

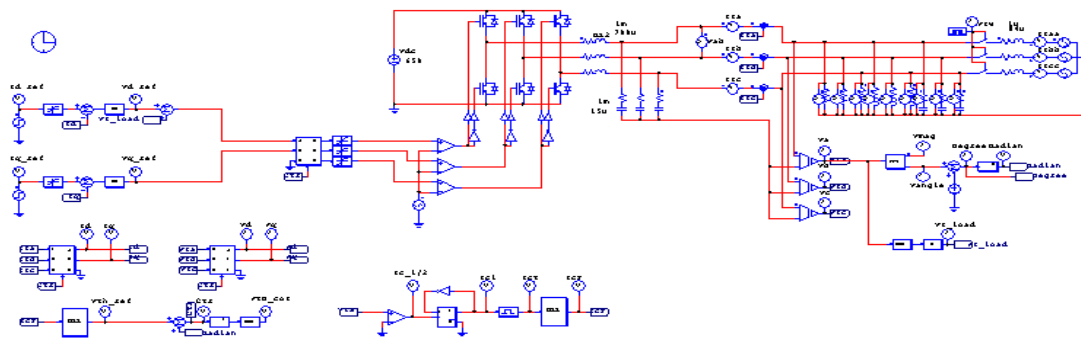


그림 5 FFT를 이용한 PLL의 시뮬레이션 회로도  
Fig. 5 Schematic diagram of PLL simulation using FFT

### 3. 시뮬레이션 및 실험

제안된 FFT를 이용한 PLL 방법의 검증을 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션과 계통연계형 태양광 인버터에 실험을 수행하였다.

표 1 계통연계형 태양광 인버터의 파라미터  
Table 1 Parameter of Grid Connected Photovoltaic Inverter

Parameter	Value
DC Link Voltage ( $V_{dc}$ )	650V
AC Output Line Voltage	380Vrms
Switching Frequency	10kHz
Filter Inductance (L)	700 $\mu$ H
Filter Capacitor (C)	15 $\mu$ F

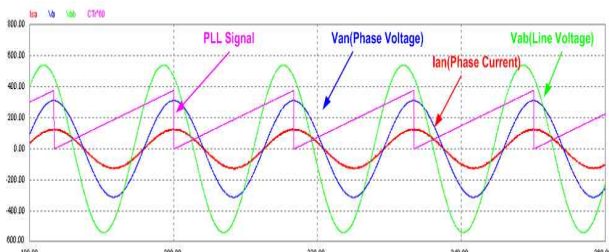


그림 6 FFT를 이용한 PLL의 시뮬레이션 결과  
Fig. 6 Simulation result of PLL using FFT

그림 6은 3상 계통연계 인버터의 FFT를 이용한 PLL의 시뮬레이션 결과 파형으로 상전압과 상전류가 영전압 교차 검출 신호에 정확히 동기됨을 확인할 수 있으며 상전압이 선간전압보다 위상이 30°뒤짐을 확인할 수 있다.

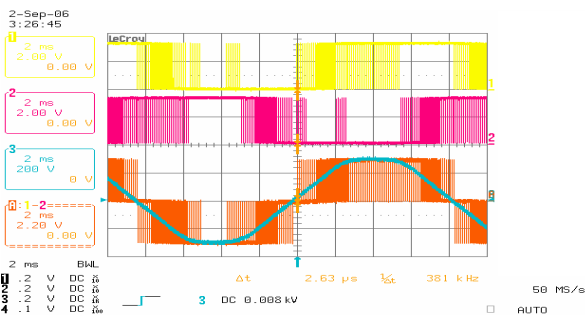


그림 7 계통연계형 태양광 인버터의 PWM 출력  
Fig. 7 PWM output of Grid Connected Photovoltaic inverter

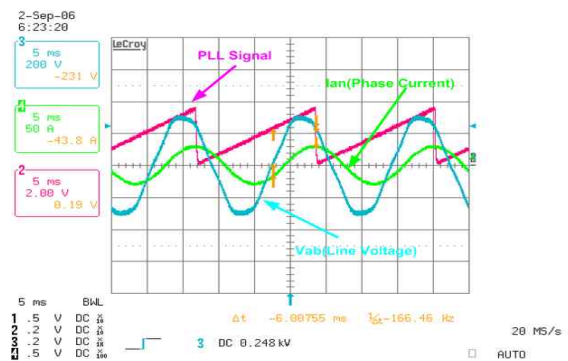


그림 8 FFT를 이용한 PLL의 실험 결과  
Fig. 8 Experimental result of PLL using FFT

그림 7과 8은 계통연계형 태양광 PCS의 실험 결과 파형으로 그림 7은 PWM 출력 파형과 전압출력이 동기됨을 볼 수 있으며, 그림 8은 FFT를 이용한 PLL 실험 결과 파형으로 상전류에 정확히 동기 됨을 알 수 있으며 상전류가 선간전압보다 위상이 30°뒤짐을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문은 새로운 FFT를 이용한 PLL의 방법을 제안 하였으며 시뮬레이션과 실험결과가 일치하다는 것을 알 수 있다. 게인 튜닝 과정없이 구현되었고, 입력신호에 노이즈가 있어도 FFT를 통하여 정확히 기본과 신호를 추정하므로 노이즈에 강하고, FFT 알고리즘이 간단하여 일반적인 마이크로프로세서로도 시간 문제없이 구현이 가능함을 입증하였다.

### 참고 문헌

- [1] L.N Arruda, B.J. Cardoso Filho, S.M. Silva, S.R. Silva, A.S.A.C. Diniz, "Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems" Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE 15-22 Sept. 2000 Page(s):1660 - 1663
- [2] V. Kaura and V. Blasko, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 1, 1997, pp. 58-63.