

Arcsin을 이용한 새로운 단상 PLL (Phase Locked Loop) 알고리즘 구현

김동희, 이웅, 고정민, 이병국  
성균관대학교 정보통신공학부

Advanced 1-Phase PLL (Phase Locked Loop) Algorithm Using Arcsin

Dong-Hee Kim, Woong Lee, Jeong-Min Ko, Byoung-Kuk Lee  
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 단상 PLL 알고리즘 중 하나인 영점검출 방식에서의 순시제어 불능을 극복하기 위해 arcsin을 이용한 알고리즘을 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 영점검출과 비교하여 제안된 PLL 알고리즘의 순시제어 가능성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 유가 상승과 화석연료의 고갈 등의 문제와 정부의 그린에너지 산업발전 정책에 따라 태양광, 풍력, 수소에너지 같은 신재생에너지 산업이 크게 각광받고 있다. 이 중에서도 태양광에너지는 발전 과정에서 공해가 없고 그 양이 무한대에 가까울 정도로 풍부할 뿐만 아니라, 지구상에 균일하게 분포되어 있다는 특성 때문에 현재 가장 주목받는 대체에너지원이다. 태양광에너지원은 독립적으로 부하를 운전하는데 이용되기도 하지만 보통 분산전원으로서 계통과 연계되어 부하에 전력을 공급한다. 계통과 연계되어 운전할 때 역률을 1로 만들고 전력품질을 높이기 위해서는 계통의 위상정보를 정확하게 측정해야 한다. 그리고 이 계통 전압의 위상 정보는 전체 시스템 제어에서 계통의 위상과 동일한 위상을 가지는 전류를 공급하는데 반드시 필요하다 [1]. 이때 계통의 위상을 검출하기 위해 입력신호의 위상과 주파수를 검출하는 PLL (Phase Locked Loop) 알고리즘이 사용된다.

이러한 PLL 제어는 계통의 전원에 따라 크게 3상과 단상으로 구분되어 연구되고 있다. 3상 시스템의 경우, d-q 변환을 이용한 3상/2상 좌표변환을 통해 전압의 벡터각으로부터 쉽게 위상각을 검출하는 것이 가능하다 [2]. 하지만 단상의 경우 이 방법을 적용할 수 없고 교류 정보에서 직접 위상 및 주파수를 검출해야 하기 때문에 3상에 비해 난해하다. 단상에서는 영점 검출 방식 (Zero Crossing PLL)이 사용되는데, 이 방법은 영점에서만 위상을 검출하기 때문에 순시적인 위상을 검출할 수 없고 계통전압에 노이즈가 유입되면 위상검출에 오류가 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 또 다른 방법으로 가상 2상 전압발생기를 이용한 검출 방법이 있지만 이것은 과정이 난해할뿐더러, 2상 전압 발생기를 위한 추가 알고리즘이나 회로를 사용해야 하는 단점이 있다 [3].

본 논문에서는 순시적인 위상 검출이 가능하고, 2상 전압발생기가 필요 없는 arcsin을 이용한 위상 검출 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안한 방법을 이용하여 1kW급 계통 연계 인버터의 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 기존의 영점 검출 PLL 제어 방식과 비교함으로써 그 우수성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 계통 연계형 태양광 에너지 발전시스템

태양광 발전 시스템은 크게 태양전지, 컨버터, 인버터로 이루어지고 일반적으로 계통과 연결되어 사용된다.

태양전지는 태양광을 직접 전기로 변환하는 광전변환소자이다. 컨버터는 태양전지의 직류출력을 원하는 크기의 직류 값으로 만들어주며, 인버터는 계통과 직접 연결되어 컨버터의 출력인 직류전력을 교류로 변환하는 역할을 한다. 이 인버터의 제어는 계통전압의 위상을 검출하기 위한 PLL과 검출한 위상을 이용하여 인버터 출력전류를 계통전압과 동상인 정현파로 만들어 주는 PWM제어를 통해 구현된다 [4].

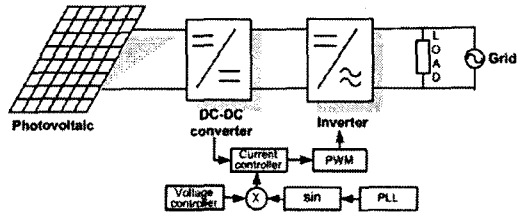


그림 1. 계통연계형 태양광 발전시스템의 일반적 구조

2.2 Arcsin을 이용한 위상 검출 방법

기존의 단상 전원의 위상을 검출하는 방법으로는 영점 검출 방식이 있다. 계통전압의 현재 값과 이전 값을 곱하여 그 값이 음수이면 이전 값과 현재 값의 부호가 다르다는 것을 나타내기 때문에 그 순간 영점을 지났다고 판단한다. 영점 검출 방법은 영점에서만 위상을 검출하므로 계통 전압이 왜곡되거나 한 주기 내에 여러 개의 영점 교차점이 존재할 경우 위상 검출에 오류가 발생할 수 있다 [4],[5].

이러한 영점 검출 방법은 측정 하려는 신호의 주파수가 변해도 영점을 지나기 전까지는 위상검출이 되지 않는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 arcsin을 이용한 간단한 알고리즘을 통해 순시적인 제어가 가능한 방법을 개발하였다. 그림 2는 arcsin을 이용한 위상 검출 알고리즘을 나타낸다.

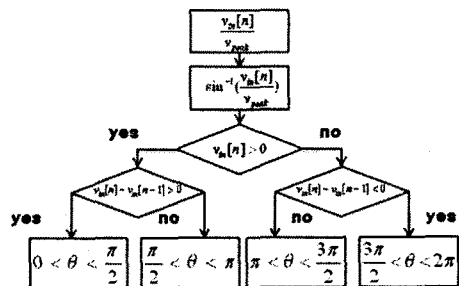


그림 2. Arcsin을 이용한 위상 측정 알고리즘

그림 2에서  $V_{in}[n]$ 을 현재 계통에서 받고 있는 신호라 하고  $V_{peak}$ 는 계통신호의 첨두치라 가정한다.  $V_{in}[n]$ 을 퍼크전압으로 나누면 이 값은 1의 크기를 가지는 정현파 형태의 파형이 되며 식 (1)과 같다.

$$V_{fun} = \frac{V_{in}[n]}{V_{peak}} \quad (1)$$

식 (1)에서 얻은 결과를 이용하여  $\arcsin(V_{fun})$ 을 취하면 매 시점마다의 위상을 얻을 수 있다. 하지만  $\arcsin$ 을 취하여 얻은 값은 한주기에서 두 개의 위상 값을 가지게 된다. 예를 들면 식 (1)을 통해 구한 값이 0.5라고 하면  $\arcsin(V_{fun})$ 로 구한 위상은  $30^\circ$ 나  $150^\circ$ 의 두 가지 경우 모두 가능하다. 이 두 값을 구별하는 알고리즘은 그림 2와 같다.

여기서 계통전압의 부호와 변화량을 고려한 전압의 기울기는 식 (2)와 같다.

$$V_{slope} = V_{in}[n] - V_{in}[n-1] \quad (2)$$

여기서  $V_{in}[n]$ 을 현재 상태 값이고  $V_{in}[n-1]$ 은 이전 값을 나타낸다.  $n$ 과  $n-1$ 의 차이가 아주 작을 경우 파형의 순간 기울기는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

계통 전압의 부호가 0보다 클 때와 작을 때를 구분하여 각각에 대하여 다시 전압의 기울기인  $V_{slope}$ 의 부호에 따라 4가지 경우로 나누었다. 각각의 경우를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

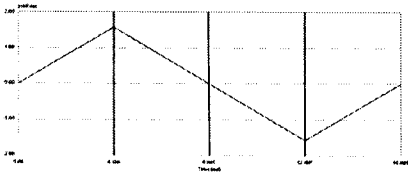
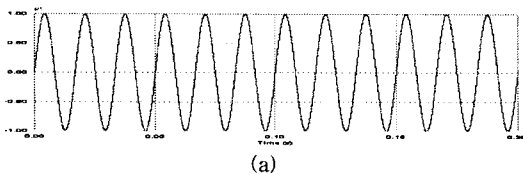
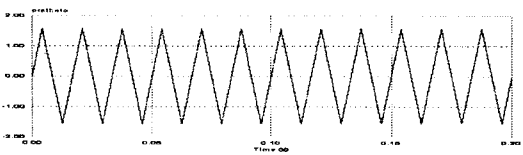


그림 3. 알고리즘이 적용되는 4가지 모드

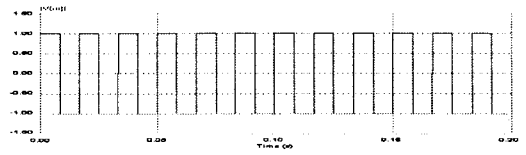
첫 번째 구간은  $V_{in}[n]>0$ 이고  $V_{slope}>0$ 인 경우로 구간의 값을 그대로 출력한다. 두 번째 구간은  $V_{in}[n]>0$ 이고  $V_{slope}<0$ 인 구간으로  $180^\circ$ 에서 구간의 값을 뺀다. 세 번째 구간은  $V_{in}[n]<0$ 이고  $V_{slope}<0$ 이다. 이 구간은  $90^\circ$ 에서 구간의 값을 빼준다. 네 번째 구간은  $V_{in}[n]<0$ 이고  $V_{slope}>0$ 인 경우로  $360^\circ$ 에서 구간의 값을 빼준다. 위상을 검출하는 과정에서 생성되는 파형은 그림 4와 같다.



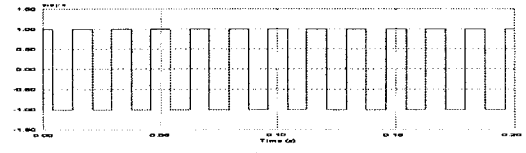
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 제안한 알고리즘의 각 단계 파형

- (a) 수식(1)의 파형: 크기 1의 정현파
- (b)  $\sin^{-1}(V_{fun})$ 의 파형: 정확한 위상검출이 불가능
- (c)  $V_{in}[n]$ 의 부호:  $V_{in}[n]>0$ 일 때 1,  $V_{in}[n]<0$ 일 때 -1
- (d)  $V_{slope}$ : 기본 정현파의 기울기 파형

그림 4(a)는 알고리즘의 첫 단계 파형으로 크기가 1인 기본 정현파와  $V_{fun}$ 을 나타낸다. 그림 4(b)는 단순히  $\sin^{-1}(V_{fun})$ 을 한 결과로 동일한 값에 대해 위상이 두 가지가 나올 수 있는 오류를 나타낸다. 이를 보완하기 위한 알고리즘의 파형은 그림 4(c)-(d)와 같다. 그림 4(c)는 계통 신호의 부호를 고려하여  $V_{in}[n]>0$ 일 때 1,  $V_{in}[n]<0$ 일 때 -1로 표현 하였다. 그림 4(d)는  $V_{slope}$ 로 그림 4(c)와 마찬가지로 0보다 클 때는 1, 0보다 작을 때는 -1로 표현 하였다.

### 2.3 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 PSIM 프로그램을 이용하였고 검증하려는 단상 전원은 크기 220V, 주파수 60Hz, 초기위상  $0^\circ$ 이다. 출력파형의 순간 기울기 값인  $V_{in}[n] - V_{in}[n-1]$ 에서  $V_{in}[n-1]$ 은 time delay block을 이용하여 구하였다. 이때 time delay의 값에 따라 위상 검출 속도가 결정된다. time delay값이 계통의 주파수 60Hz보다 상대적으로 작으면 작을수록 보다 정확한 측정이 가능해진다. 그림 5는 초기 위상이  $0^\circ$ 인 단상 계통 전압의 위상을 검출한 결과이다.

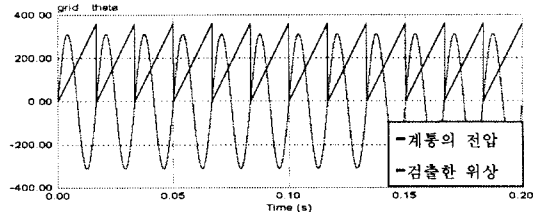


그림 5. Arcsin을 이용한 사인파 검출

그림 5의 파형으로부터 제안된 arcsin을 이용한 위상 검출 알고리즘이 단상 계통 전압의 정확한 위상 검출이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

두 번째 시뮬레이션에서는 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하기 위해 영점 검출 방법의 결과와 비교하였다. 단상 전원 계통은 크기 220V, 주파수 60Hz, 초기 위상을  $120^\circ$ 로 하고 1kW급 인버터를 그림 6과 같이 설계하여 수행하였다.

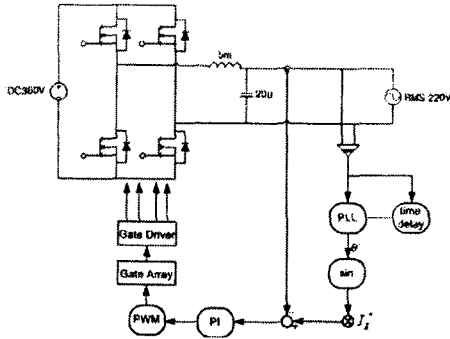


그림 6. Arcsin PLL 제어 시스템 구성도

컨버터 출력 전압 380V를 직류링크전압으로 설정하였고 PLL로 위상을 검출하여 단상 풀브리지 인버터의 출력전류를 제어한다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 영점 검출 방법과 arcsin을 이용한 방법 모두 표 1과 같다. 인버터의 정상동작유무를 확인하기 위해 인버터 출력 전류를 계통 전압의 파형과 비교하였고 그 결과는 그림 7-8과 같다.

표 1. arcsin PLL 제어 시스템의 시뮬레이션 조건

	실행시간	0~0.2sec
전원부	전압(RMS)	220V
	주파수	60Hz
	초기위상	120°
제어부	PI gain	5
	PI 시정수	0.001
	time delay	0.00001
인버터	출력 전류(RMS)	4.5455A
	용량	1kW
	PWM 주파수	10kHz

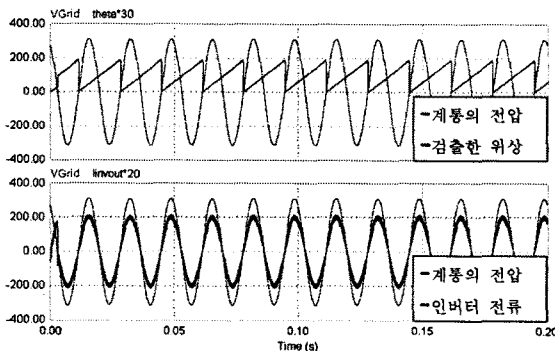


그림 7. 영점 검출 방법 시뮬레이션

그림 7은 120°의 초기 위상을 가지는 단상 계통전압에 대해 영점 검출 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 파형이다. 처음 영점을 지나기 전까지는 위상 검출이 불가능하기 때문에 이 구간에서 인버터 출력전류가 제어되지 않음을 알 수 있다.

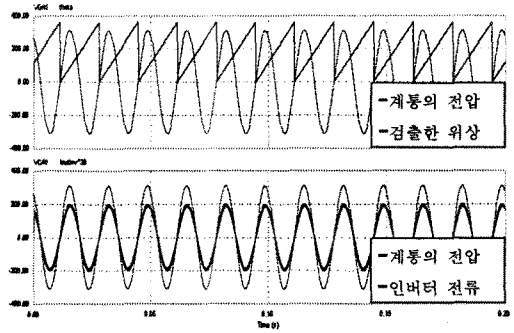


그림 8. Arcsin PLL 시뮬레이션 결과

그림 8은 제안된 arcsin알고리즘을 이용할 경우의 시뮬레이션 결과 파형이다. 영점검출방식의 시뮬레이션 결과와 달리 센싱 받은 계통 전압이 영점을 지나지 않았을 경우에도 인버터 출력 전류가 처음부터 전원의 위상을 추종하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 계통의 주파수가 순간적으로 변할 때 기존의 영점 검출 방식은 다음 영점을 검출하기 전까지 이전의 주파수를 추종하기 때문에 변화한 계통의 주파수를 검출하지 못하는 오류가 발생한다. 반면에 제안한 arcsin PLL방식은 주파수가 변해도 순시적인 제어가 가능하기 때문에 주파수가 변하는 경우 빠르고 정확한 위상 검출이 가능하다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 arcsin을 이용하여 순시적인 위상 검출이 가능한 PLL 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 기존의 방식에 비해 알고리즘 구현이 쉽고 계통전압의 주파수 변동이 있을 시에도 빠르고 정확한 위상 검출이 가능한 장점을 가진다. 이를 증명하기 위하여 시뮬레이션을 통해 계통의 정확한 위상 검출이 가능함을 확인하였다. 또한 초기 위상을 120°로 설정한 시뮬레이션을 통해 영점 검출 방식의 제어 결과와 arcsin을 이용한 PLL의 제어 결과를 비교하여 제안한 방식의 우수성을 입증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Guan-Chyu Hsieh, Hung J. C, "Phase-locked loop techniques-loop techniques.A survey," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol 43, no. 6, December, pp. 609-615, 1996
- [2] H. S. Mok, S. H. Kim, Y. H. Cho, "Torque ripple reduction of PMSM caused by position sensor error for EPS application," Electronics Letters, vol. 43, no. 11, pp. 646-647, 2007
- [3] Silva S. M., Lopes B. M., Fiho B. J. C., Campana, R. P., Bosventura, W. C., "Performance Evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connect systems," in Conf. Rec. of the 2004 IEEE IAS, vol. 4, pp. 2259-2263, 2004
- [4] 김용근, 최중우, 김홍근, "계통 연계형 태양광 발전 시스템의 위상 동기화를 위한 디지털 PLL 제어," 대한전기학회논문지, 53B권 9호, 9월, pp. 562-568, 2004
- [5] 김형수, 최중우, "정상분 전압 관측기를 이용한 불평형 3상 전원의 PLL," 전력전자학회논문지, 13권 2호, 4월, pp. 145-151, 2008