

계통연계형 3KW 태양광발전 PCS 기술 분석

차한주, 이상희

충남대학교

Analysis of Utility Interactive 3KW Photovoltaic Power Conditioning System

Hanju Cha, Sanghoe Lee

Chungnam National University

Abstract - 이 논문에서는 계통연계형 3KW 태양광 발전 시스템 개발에 필요한 기본적인 요소기술로서 MPPT(Maximum Power Point Tracking), 계통연계를 위한 단상 PLL(Phase Locked Loop), 퍼크전압검출법과 전류제어기법 등을 살펴보고 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. 또한 검증된 기법들을 토대로 3kW 태양광 발전 PCS(Power Conditioning System)에 적용실험을 통해 결과를 확인하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 신재생에너지시스템에 많은 관심이 집중되고 있다. 이 중 태양광발전시스템은 공해 없이 전기를 생산하고, 무한한 태양에너지를 전기로 직접 변환하는 장점을 가지고 있어 많은 잠재적 발전 가능성이 보이고 있다. 최근에는 성능향상을 위해 태양전지 생산 비용을 줄이고 태양전지와 인버터의 효율을 최대로 이용하는 것이 주된 목적을 이루고 있다. 이는 가까운 미래의 화석연료의 고갈을 대비하며 대체에너지로서의 태양광발전 시스템에 많은 기대를 하고 있기 때문이다. 그래서 본 논문에서는 계통연계 3kW급 태양광 PCS 개발과정 중 이용된 이론과 실험을 검증하고 시뮬레이션과 비교분석하여 보았다.

2. 태양광발전 시스템

2.1 태양광발전 PCS 구조

태양광 발전 시스템의 PCS는 현재 여러 방면으로 많은 토플로지와 새로운 테크닉이 제시되고 있다. 간단히 토플로지들을 살펴보면 저주파 변압기 방식, 고주파링크 방식, 무변압기 방식 등등이 주로 이용되고 있으며 각각의 토플로지는 장단점은 다가지고 있지만 본 논문에서는 저주파 변압기를 사용하지 않고 고효율, 소형, 경량화에 유리한 특징을 가지는 무변압기 방식의 PCS를 이용하여 시스템을 구현하였다. 이 방식에는 승압용 부스트 컨버터와 계통연계용 인버터가 주를 이룬다.

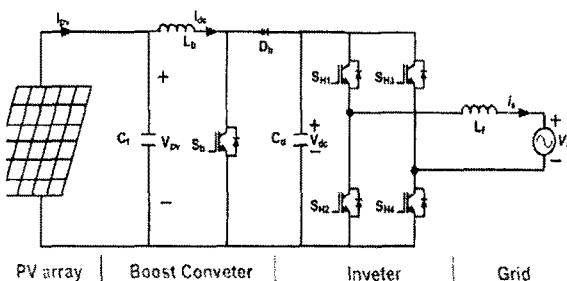


그림 1 계통연계형 태양광 PCS 구조

그림1은 계통연계형 태양광 PCS의 전체적인 구조이다. PV아레이부분과 부스트 컨버터 부, 인버터 부 그리고 계통으로 구성되어 있다.

부스트 컨버터는 PV아레이의 전압을 조정하여 MPPT를 수행하여 최대한 많은 전력을 뽑아내는데 이용 된다. 현재 많은 알고리즘이 구현되어 상용화되어 있지만 아직도 효율을 올리기 위한 연구가 계속적으로 이루어지고 있으며 본 논문에서는 Modified Incremental Conductance를 간략하게 구현하였다. 인버터 부는 풀 브리지 유니풀라방식을 사용하였으며 IGBT의 손실발생과 DSP의 연산 가능 속도 등을 고려하여 스위칭주파수는 10kHz를 사용하였다. 인버터의 제어방법은 주로 정지형인버터의 경우 전압 제어 방법을 사용하지만 계통연계 인버터는 전압형 전류제어방식을 주로 이용하므로 이 방법을 사용하여 PWM 제어에 응용하였다.

2.2 MPPT

최대출력점 추종제어에는 많은 기법들이 현재 나와 있다. 대표적인 방법에는 Perturb and Observe(P&O)와 Incremental Conductance(IncCond)가 있는데 지금은 이를 알고리즘을 업그레이드하여 좀 더 빠른 추종을 보이는 다양한 기법들이 나오고 있다. 본 논문에서도 기존의 Incremental Conductance기법을 간략화한 Modified Incremental Conductance 방법을 적용하였다. 알고리즘을 간단히 살펴보면 V_{ref} 값이 일정 상수만큼 증가 혹은 감소하는 것이 아니라 기울기(dp/dv) 혹은 전류의 변위(dI)에 비례상수(k_1, k_2)를 곱하여 최대전력점으로 도달시 oscillation을 최소화하고 일사량 급변 시에도 최대전력점에 도달하기 위한 V_{ref} 값을 최소화 하며 MPPT를 수행한다.

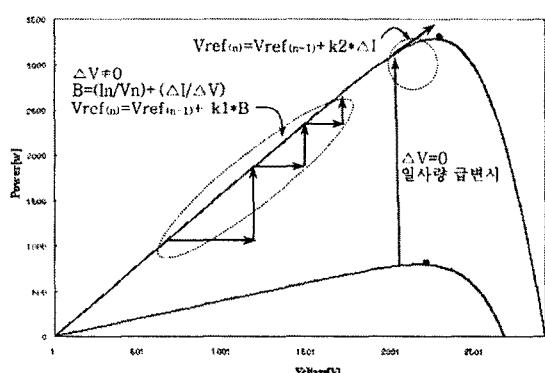


그림 2 Modified Incremental Conductance 추종제어

처음 전압과 전류를 측정하고($V_{(n)}, I_{(n)}$) ΔV 와 ΔI 를 이용하여 기울기 $\beta(I + (\Delta I / \Delta V) * V)$ 을 구한다. 다음으로 동작점이 최대전력점을 벗어나 있을 때($\beta=0$)에는 이전 $V_{ref(n-1)}$ 값($V_{ref(n-1)}$)에 $k_1\beta$ 를 즉, 기울기 β 의 정도에 따라 최대전력점에 근접할 수록 $k_1\beta$ 값은 줄어들 것이다. 또한 최대전력점에서 일사량 급변시($\Delta V=0$)에는 ΔI 에 k_2 를 곱해주어(일사량 급변의 정도에 따라 $k_2\Delta I$ 의 값도 바뀔 것이다) MPPT를 수행한다. 이러한 과정으로 최대출력점 추종제어를 하며 그림 2와 3에서 간단히 확인 할 수 있다.

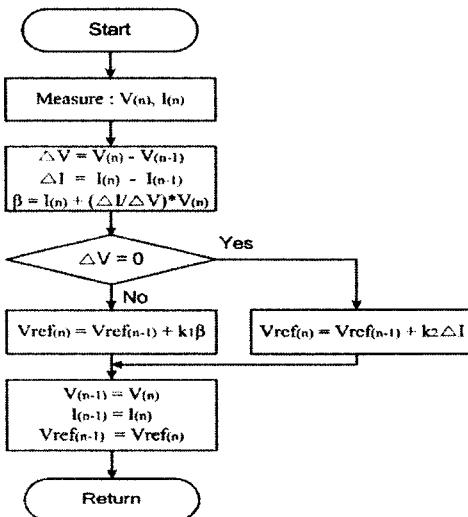


그림 3 Modified Incremental Conductance 순서도

2.3 단상 DPLL

다양한 분산전원의 계통연계 시스템을 개발하기 위해서는 우선적으로 계통의 위상을 정확히 검출하는 기법이 필요하다. 현재 많은 PLL 기법들이 나와 응용대고 있으며 기존에는 주로 영점검출방식을 사용하였다. 이 방식은 구현은 간단한 장점은 있지만 추종속도가 느리며 노이즈에 민감한 단점 때문에 본 논문의 시스템에서는 가상 2상검출 방식을 사용하였다. 가상 2상 방식에는 arctan 방식과 동기좌표계를 이용한 방식이 있으나 추종속도를 고려하여 동기좌표계 방식을 선택하고 메모리 테이블을 이용하여 정상상태 맵동을 최소화 하였다.[1] 가상의 상을 만들기 위해 전역통과필터를 사용하였으며 필터의 수식은 수식(1)~(3)과 같다.[2]

$$H(s) = \frac{\omega - s}{\omega + s} \quad s = \frac{2}{T_c} \frac{z - 1}{z + 1} \quad c = \frac{T_c \omega - 2}{T_c \omega + 2} \quad (1)$$

$$H(z) = \frac{\omega T_c - 2 + (\omega T_c + 2) z^{-1}}{\omega T_c + 2 + (\omega T_c - 2) z^{-1}} \quad (2)$$

$$y(k) = -c y(k-1) + c V_s(k) + V_s(k-1) \quad (3)$$

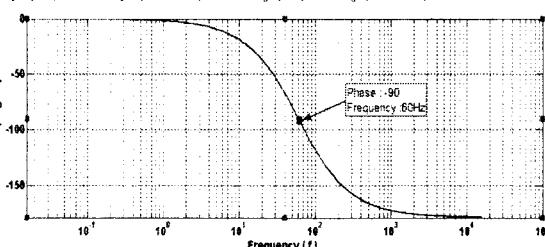


그림 4 전역통과필터 위상 보드선도

필터의 수식은 Matlab을 이용하여 보드선도를 그림4와 같으며 위상의 자연을 확인하였다.

계통 파형과 전역통과필터를 거친 파형은 위상이 90도 차이가 생기며 이를 d-q 변환을 통해 동기좌표계를 바꾸어 준다. 수식(4)~(5)는 파형을 동기좌표계로 변환되는 과정을 풀어 정리 하였다. 수식(5)에서처럼 크기와 위상을 구할 수 있으며 이 과정을 통해 전압검출이 가능해져 Sag와 Swell 등의 왜란을 검출 할 수 있다. 이 외에도 빠르게 전압을 검출하는 기법이 있으나 동기좌표계의 방법과 비교하여 본 결과 많은 차이가 없어 동기좌표계를 이용하여 검출하였다.[3]

$$\begin{aligned} V_{d\epsilon} &= V_{ds} \cos \theta + V_{qs} \sin \theta \\ V_{q\epsilon} &= -V_{ds} \sin \theta + V_{qs} \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{If } \theta = \bar{\theta}$$

$$V_{d\epsilon} = \cos \theta \sin \bar{\theta} - \sin \theta \cos \bar{\theta} = 0 \quad (5)$$

$$V_{q\epsilon} = -\sin \theta \sin \bar{\theta} - \cos \theta \cos \bar{\theta} = -V_m \quad (5)$$

그림5는 프로그램으로 구현된 DPLL의 전체적인 구성도이다. 간단히 정리하여 보면 입력계통전압을 전역통과필터를 통해 두 개의 파형으로 만들어 동기좌표계를 통해 위상을 피드백 받아 위상차를 보상하고 PI제어를 통해 추종위상과의 차를 적분을 통해 더해주어 위상을 추종하게 된다. 이 알고리즘을 통해 얻어진 계통위상을 이용하여 인버터부의 계통연계 PWM을 만든다.[4]

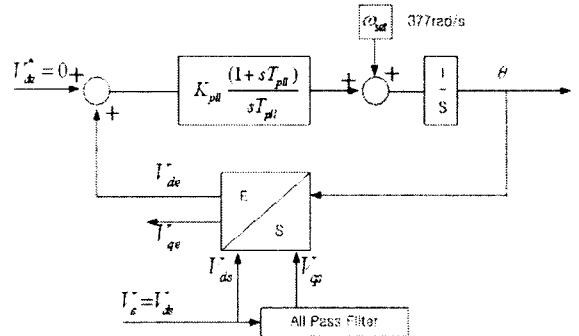


그림 5 전체적인 DPLL 구현 구성도

2.4 전류 PWM 제어

본 논문의 태양광 발전시스템에는 두 부분에서 PWM 신호가 필요하다. 첫 번째는 MPPT를 위한 부스트 컨버터용 PWM과 인버터부의 PWM이다. 이 두 PWM의 제어과정을 살펴보면 부스트 컨버터는 그림6과 같다.

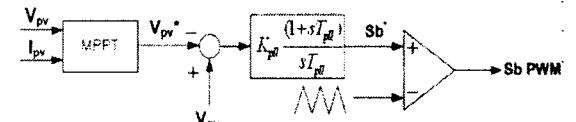


그림 6 부스트 컨버터 PWM 제어 블럭도

인버터부의 PWM 제어는 풀 브리지 유니풀라 방식을 사용하였으며 그림7과 같은 과정을 통해 제어를 한다.

그림7에서처럼 태양전지로부터 나오는 전압(V_{pv})은 부스트 컨버터를 거쳐 전압(V_{dc})을 DC링크 커��시터에 충전을 한다. 이 전압은 저역통과필터를 이용하여 센싱하고 일정하게 유지시켜야 한다. 또한 계통전압(V_s)을 읽어 들여 PLL과정을 통해 위상정보를 취득하여 출력전류 만들게 된다. 출력 전류는 태양전지에서 공급되어지는 파워에 의해 결정되어지므로 커패시터의 전압이 발전에 중요한 역할을 담당한다. 이때에 발전 출력은

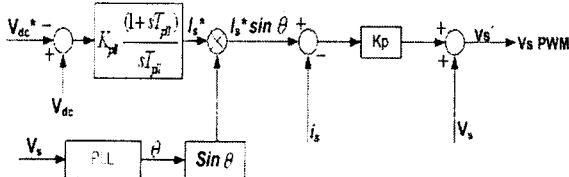


그림 7 인버터 컨트롤 제어 블럭도

PWM의 성능을 보정을 고려하여 자동전압조정기(AVR:Automatic Voltage Regulator) 기능을 적용하였다.

3 실험 결과

PSIM을 이용하여 제어 알고리즘 구현하였으며 시뮬레이션의 파형은 그림8과 같으며 전역통과필터(V_{ds}, V_{qs}), 동기좌표변환(V_{de}, V_{qe}) 위상각($\hat{\theta}$), 계통전압(V_s), 전류(I_s) 파형을 확인 할 수 있다. 계통의 전류는 10배하여 위상의 관계를 확인하였다.

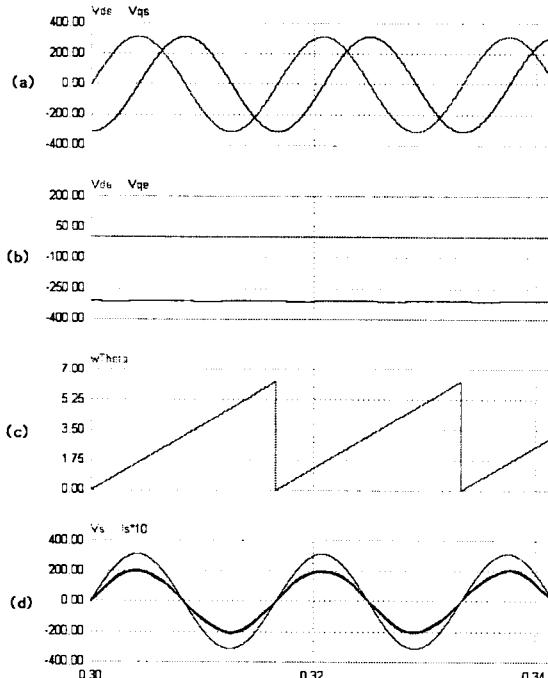


그림 8 시뮬레이션 파형 (a) V_{ds}, V_{qs} (b) V_{de}, V_{qe} (c)DPLL 위상 (d)계통전압 V_s , 전류 I_s

표1은 PCS와 시뮬레이션에 사용된 회로정수를 정리하였다. 실험은 시뮬레이션으로 구현한 사항들을 실제 PCS에 동작하여 오실로스코프로 파형을 측정하였다. 계통전압 V_s 는 직접 측정하였고 프로그램으로 구현되는 알고리즘 데이터들은 DA카드를 사용하여 측정하였다. 실험들은 PLL 위상추종실험과 전압검출 실험을 하였다.

표 1 3kVA PCS 회로정수

Utility voltage	220V, 60Hz
Switching frequency	$f_s = 10$ kHz
Input filter capacitor	$C_f = 2000\mu F$
Input filter inductor	$L_b = 2mH$
DC-link capacitor	$C_d = 6000\mu F$

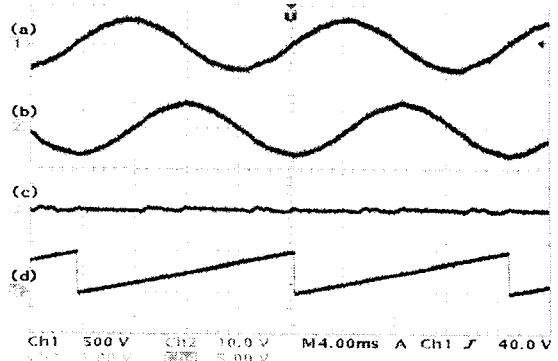


그림 9 PLL 위상추종실험 (a)계통전압 V_s (b)전역통과필터 V_{sf} (c)동기좌표변환 V_{de} (d)위상각 $\hat{\theta}$

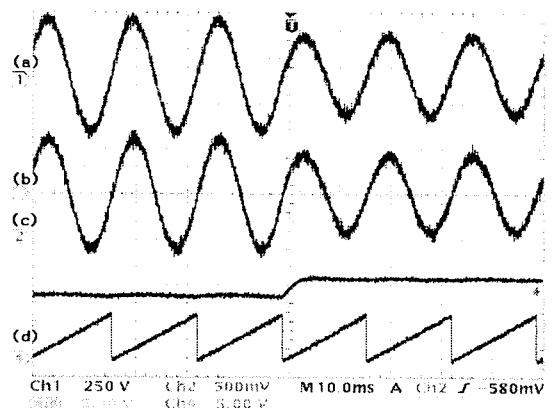


그림 10 전압검출실험 (a)계통전압 V_s (b) V_s' (c)검출피크전압 V_{qe} (d)위상각 $\hat{\theta}$

그림 9에서는 계통전압에 위상을 추종이 잘되는 것을 확인 할 수 있었고 그림 10에서는 전압강하시의 전압검출 실험한 결과 전압추종이 잘 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 시뮬레이션과 PCS간 다르지 않은 파형을 확인 할 수 있었으며 위상추종, 전압검출 등 태양광발전에 필요한 알고리즘의 구현이 실증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 3KW 태양광 PCS에 필요한 제어기법들을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였고 이를 바탕으로 3KW 태양광 PCS에 적용한 실험 결과를 소개하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Sakamoto, T.Izumi, T.Yokoyama, T.Haneyoshi, "A New Method for Digital PLL control Using Estimated Quadrature Two Phase Frequency Detection", IEEE CNF PCC(Power Conversion Conference), vol 2, p 671-676, April 2002
- [2] Jung-Min Kwon, Kwang-Hee Nam, Bong Hwan Kwon, "Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, p. 1048-1054, August 2006.
- [3] Se Kyo Chung, "A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters", IEEE Transactions On Power Electronics, vol.15, no.3, p. 431-438, May 2000
- [4] J.V.Blasco, V.Kaura, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol.33, no.1, p.58-63, January/February 1997