

계통연계형 태양광발전 시스템의 제어기법

김대균*, 전기영*, 함년근**, 이상집*, 오봉환***, 정춘병*, 김용주§, 한경희*

*명지대학교, **인텍 FA, ***명지전문대학, §동양공업전문대학

Control Technique of a Utility Interactive Photovoltaic Generation System

Dae-Gyun Kim*, Kee-Young Jeon*, Nyun-Gun Hahm**, Sang-Chip Lee*, Bong-Hwan Oh***, Choon-Byeong Chung*, Yong-Joo Kim§, Kyung-Hee Han*

*Myongji Univ, **In-Tech FA, ***Myongji College, §Dongyang Tech College

ABSTRACT

The paper proposes the solar photovoltaic power generation system method for photovoltaic system to solve the power shortage due the sudden power demand. So that supplied electric power to system at appearance during surplus electric power minute and unit moment link driving with common use system is available, digital PLL circuit system voltage through composition and phase of solar photovoltaic power generation system to do synchronization do. Feed forward controller was applied to get fast current response. Solar cell that is changed by solar radiation always kept the maximum output when it used Step up chopper. The dynamic character had checked through simulation used Matlab Simulink and confirmed through an experiment.

1. 서론

태양광발전 시스템은 어떤 환경오염도 유발하지 않으면서도 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환할 수 있기 때문에 대체에너지로 주목받고 있다.

본 논문에서는 PWM 컨버터를 이용하여 태양광발전 시스템을 구성하였고, 시스템의 구성은 절연변압기를 사용한 방식에 비해 시스템의 소형화를 위해서 직렬 리액터를 사용하여 계통전원과 연계하였다^{[1][2]}. 또한 본 시스템은 급격한 수요증가에 의해 발생하는 침투부하에 의한 전력부족현상을 해소할 수 있도록 태양광발전 시스템으로부터 발생된 출력을 부하에 공급할 수 있도록 하였다. 잉여전력분 발생시 계통에 공급하여 상용계통과의 단위역률 연계운전이 가능하도록 디지털 PLL(phase locked loop)회로를 구성하여 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켰다. 그리고 빠른 전류응답을 얻기 위하여 피드포워드(feed-forward) 제어기를 적용하였으며, 승압효과를 이용하여 일사량 변동에 따른 태양전지의 출력을 항상 최대로 하였다. 이러한 동작특성을 Matlab Simulink를 통하여 검토하고, 실험을 통하여 확인하였다.

2. 계통연계형 태양광발전 시스템

2.1 전체 제어 시스템

그림 1은 본 논문에 적용한 시스템 제어블록도이다. 전체적인 제어방식은 전류 벡터제어를 수행하였다. 계통전원의 위상을 디지털 PLL회로를 이용하여 추정하고, 추정된 위상을 기준으로 좌표변환을 수행하여, 단위역률 연계운전을 위한 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켰다. 승압효과를 태양전지의 최대출력점 제어를 수행하며, 컨버터의 q 축 전류지령값은 태양전지의 최대출력점을 추종하는 시점에서의 전류값이 된다. 또한 컨버터의 계통연계시 발생할 수 있는 DC 오프셋 전류를 보상하기 위해 오프셋 전류 제어기가 구성되어 있다.

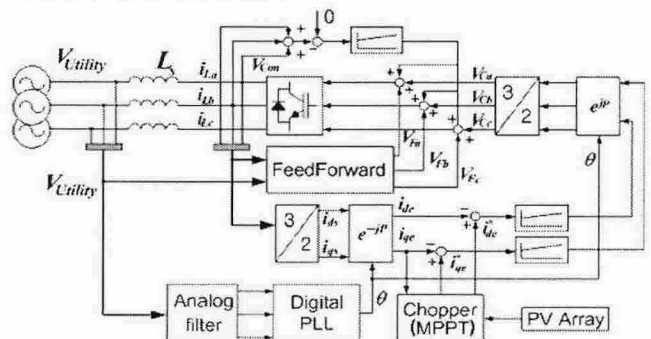


그림 1 제어 블록도

2.2 Feed-forward 제어기

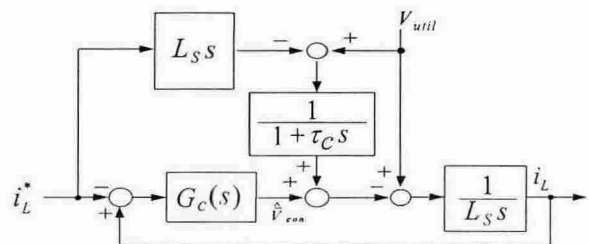


그림 2 피드포워드 제어블록도

그림 2는 시스템의 전류 속도제어를 위한 피드포워드 제어회로를 나타내고 있다. 다음 제어블록에서 전류지령에 대한 부하 전류응답, 즉 전체전달함수를 구하면 식 (1)과 같

다. 여기에서, $G_c(s)$ 는 컨버터의 PI 전류제어기, i_L 은 계통 주입전류, τ_c 는 피드포워드 블록의 필터 시정수이며, τ_c 를 '0'이라 한다면, 위의 시스템은 이상적인 전류제어 루프를 구성할 수 있다. 그러나 실제 시스템에서는 미분된 전류 값을 그대로 이용할 수 없기 때문에, 본 논문에서는 필터의 시정수 τ_c 를 '0.001'로 설정하였다. 이러한 경우 필터에 의한 시스템의 지연과 반응을 근계적도를 통하여 살펴보았다. 그림 3은 시스템에 영향을 줄 수 있는 피드포워드 제어기의 우세극점을 나타내었다.

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{1}{1 + \tau_c s} + \frac{1}{L_s s} G_c(s) \quad (1)$$

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{1}{1 + \frac{1}{L_s s} G_c(s)}$$

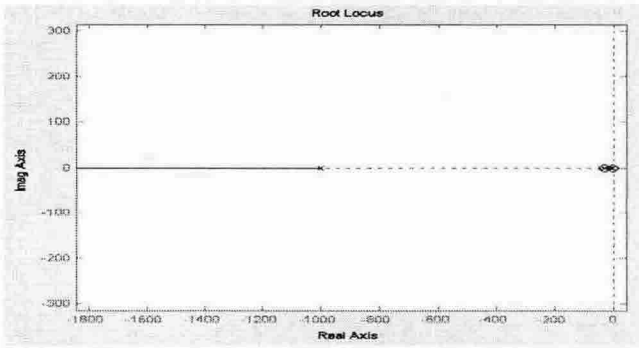


그림 3 $\tau_c = 0.001$ 인 경우의 우세극점

그림 3에서 우세극점은 -1000 정도로 안정적인 빠른 응답을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서 구현하고자 하는 태양광발전 시스템의 전류제어에 적합함을 확인할 수 있다.

2.3 전류제어기

3상 정지 좌표계로 표현된 수식을 2상 정지 좌표계로 변환하고, 다시 ω 로 회전하는 2상 회전 좌표계로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} E_q \\ E_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + R & \omega L_s \\ -\omega L_s & L_s + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 전류에 관한 식으로 풀어보면 다음과 같다.

$$L_s \frac{di_q}{dt} = -i_q R + E_q - V_q - \omega L_s i_d \quad (3)$$

$$L_s \frac{di_d}{dt} = -i_d R + E_d - V_d + \omega L_s i_q \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터, d-q 전류제어계에 있어서 d축에서 q축으로의 간섭분 $-\omega L_s i_d$ 와 q축에서 d축으로의 간섭분 $\omega L_s i_q$ 가 존재함을 알 수 있다. 이러한 영향을 없애기 위하여 간섭분을 미리 보상하는 비간섭 전류제어를 행한다.

2.4 디지털 PLL 회로

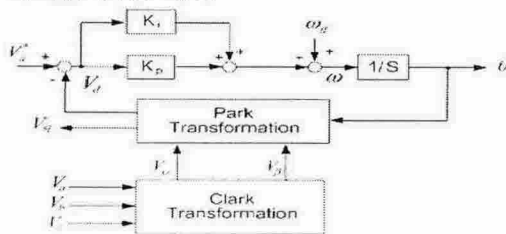


그림 4 3상 디지털 PLL 구조

그림 4는 3상 디지털 PLL의 구조를 나타내고 있다. 계통 전압의 위상각은 계통연계 시스템에 있어 가장 기본적인 중요한 정보이며 계통연계 시스템에서 정확하고 빠른 계통전압의 위상각 검출은 정확한 레퍼런스의 생성을 위해 필요하다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 본 논문에서는 MATLAB Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

표 1은 PWM 컨버터 및 태양전지의 파라미터로서 시뮬레이션 및 실험에 적용하였다.

표 1 PWM 컨버터, 태양전지의 파라미터

PWM 컨버터의 파라미터		태양전지의 파라미터	
컨버터 DC 링크 전압	350 [V]	개방전압	18.0[V]
스위칭 주파수	5 [kHz]	단락전류	3.32[A]
계통전압	220 [V]	정격전압	13.6[V]
직렬 리액터	5 [mH]	정격전류	2.95[A]

3.1 시뮬레이션

그림 5는 본 논문에 적용된 태양전지의 특성을 나타내고 있다. 태양전지의 특성곡선에서 볼 수 있듯이 최대출력점에서 출력전류는 4.2[A] 정도의 값을 보여주고 있다.

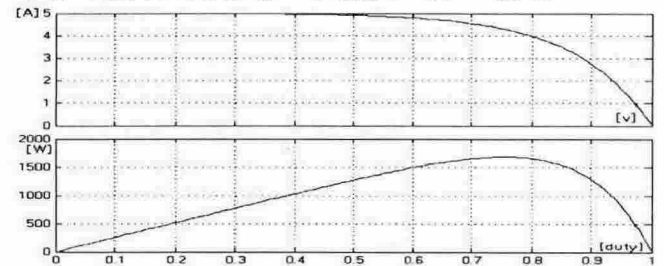


그림 5 태양전지의 전압-전류 및 출력 특성곡선

그림 6은 최대출력점제어를 위한 컨버터의 d-q전류 지령치 및 출력전류 파형을 나타내고 있다.

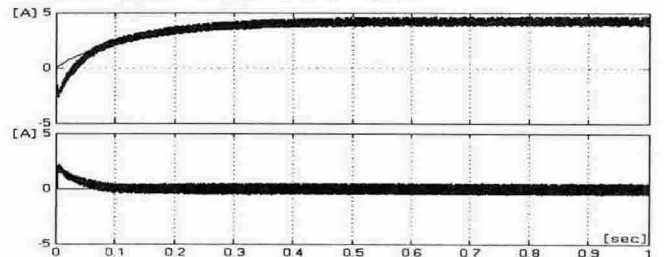


그림 6 d-q전류 지령치 및 출력전류

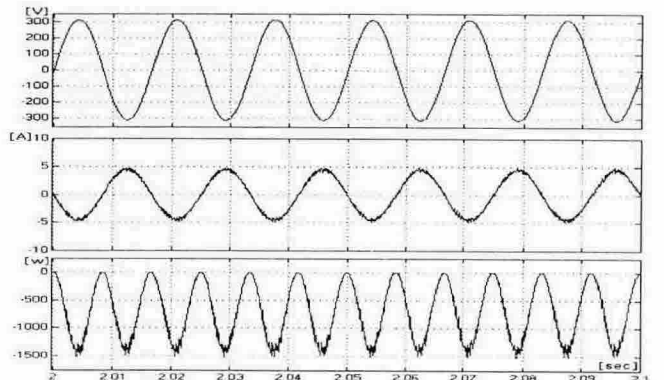


그림 7 a상 계통전압과 a상 출력전류 및 출력전력

그림 7은 a상 계통전압과 컨버터의 출력전류 파형, 그리고 그 때의 출력전력을 나타낸 것으로 계통전압과 컨버터 출력전류의 극성이 반대이고, 출력전력값이 음의 값을 가지므로 태양광발전에 의한 에너지가 계통으로 전달되는 것을 알 수 있다. 또한, 위상차가 180°를 보이고 있으므로 단위역률로 계통에 에너지를 공급함을 보여주고 있다. 따라서 디지털 PLL 회로의 동작이 양호함을 알 수 있다.

3.2 실험결과

그림 8과 같이 계통전압과 출력전류의 위상이 거의 일치함을 알 수 있고, 이를 통해 태양광발전 시스템은 태양전지로부터 발생된 에너지를 고역률로 계통전원측에 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

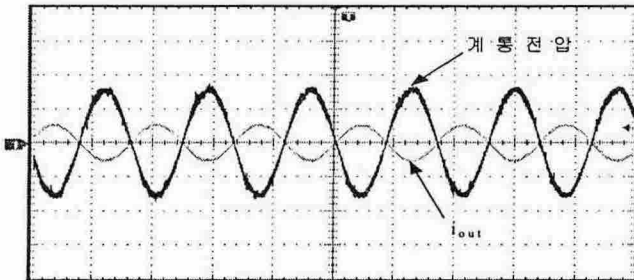


그림 8 계통전압과 컨버터 출력전류 파형
(CH1: 200[V/div], CH4: 5[A/div], TD: 10[ms/div])

그림 9는 PWM 컨버터 출력전류의 d-q 변환 파형을 나타낸다.

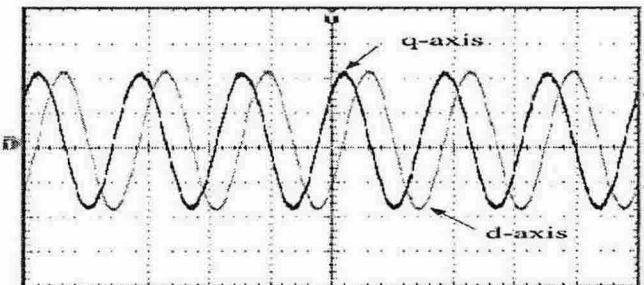


그림 9 d-q 변환된 출력전류의 D/A 컨버터 출력
(CH1: 1[V/div], CH2: 1[V/div], TD: 10[ms/div])

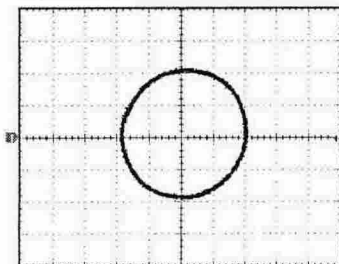


그림 10 d-q 변환된 출력전류의 벡터궤적
(CH1: 1[V/div], TD: 10[ms/div])

그림 9의 d축전류와 q축전류를 X, Y축으로 하여 벡터궤적을 얻은 결과 그림 10로부터 출력전류는 외란 성분은 없으나 완전한 3상 평형전류가 흐르지는 못하는 것을 알 수 있다. 이는 PWM 컨버터의 직렬 리액터의 값이 같지 않고 계통전압의 상전압 크기가 절대적으로 평형하지 않기 때문이다. 그러나, 이러한 정도의 불평형은 계통에 영향을 주지

않을 것으로 판단된다.

그림 11은 전류제어에 의한 q축 지령전압에 대한 q축 전류파형과 a상 전류 파형을 나타낸다. 그림에서와 같이 전류가 빠르게 추정함을 확인할 수 있다.

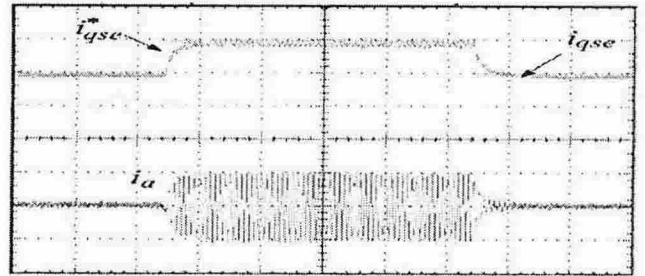


그림 11 q축전류와 상전류의 파형
(CH1:5[A/div],CH2:5[A/div],TD:10[ms/div])

그림 12는 같은 조건에서 시스템으로부터 계통으로 유입되는 전류의 고조파 성분을 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 기본과 전류 성분이외에 다른 고조파 성분은 없다.

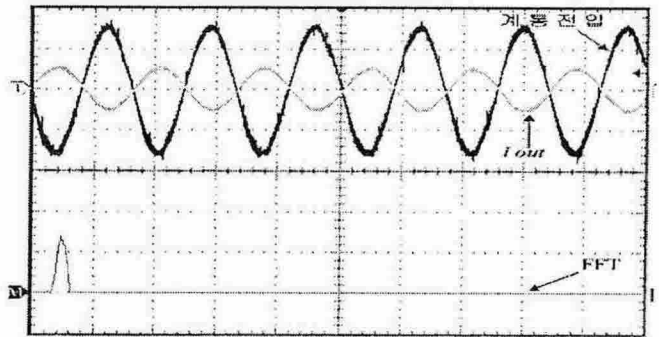


그림 12 컨버터 출력전류의 FFT 분석(CH1:200[V/div], CH2:5[V/div],TD:10[ms/div])(Math:2[A/div],125[Hz/div])

4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 태양광발전 시스템을 PWM 컨버터로 구성하여 상용계통과 연계운전함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 디지털 PLL 회로를 구성하여 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켜 단위역률 연계운전이 가능함을 확인하였다.
- (2) 컨버터 출력전류의 속도제어를 위하여 피드포워드 제어기를 적용한 결과 동작특성이 원활히 수행됨을 확인하였다.
- (3) 태양전지의 출력은 승압초퍼를 이용하여 일사량 변동에 대해 항상 최대출력이 유지되도록 MPPT제어를 하였다.

참고 문헌

- [1] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE Trans. Power Electronics., vol. 16, pp.46-54, 2001.1.
- [2] Chihchiang Hua and Chihming Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system", IEEE-PESC Conf. Rec., vol. 1, pp.86-93, 1998.