

양극성 직류 배전망 연계 태양광 발전 시스템의 설계 및 제어

송준호*, 홍석진*, 강경민*, 현승욱*, 원충연*
성균관대학교*

Design and Control of Bipolar DC grid connected PV System

Song Jun ho*, Hong Seok jin*, Kang Kyung min*, Hyun Seung wook*, Won Chung yuen*
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

본 논문에서는 태양광 발전 전력을 스위칭 손실 없이 승압하여 밸런싱 회로를 통해 균일하게 전압을 양극성 직류배전망으로 전달하는 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템에 대한 컨버터 설계와 제어를 수행하고 이를 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 신재생에너지에 대한 수요가 증가하면서 신재생에너지와의 연계에 있어 효율적인 직류배전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 태양광 발전은 신재생에너지의 많은 부분을 차지하고 있으며 $\pm 750\text{Vdc}$ 전압 레벨로 구성된 양극성 직류배전망과 연계하는 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 태양광을 통해 고승압된 전압이 양극성 직류배전망으로 전달되는 과정에서 전압이 배전망 한쪽 극성으로만 전달되는 전압 불평형 현상이 발생할 수 있다. 따라서 태양광과 컨버터를 거쳐 고승압된 전압이 양극성 직류배전망으로 안정적으로 전달되기 위해서는 컨버터 출력단에 추가적인 밸런싱 회로를 구성할 필요가 있다.

본 논문에서는 이런 문제점을 해결하는 전반적인 시스템을 제안한다. 태양광 출력 전력을 MPPT제어를 통해 수행하였으며 이때 발생한 전압을 풀브릿지 컨버터를 통해 승압하고 공진형 LLC 회로를 추가하여 높은 스위칭 주파수에서 스위칭 손실을 크게 저감할 수 있는 회로를 구성하였다. 또한 풀브릿지 컨버터 출력단에 하프브릿지 회로를 통한 전압 밸런싱 회로를 구성하여 안정적으로 $\pm 750\text{Vdc}$ 직류 배전망으로 전달하도록 구성하였다. 제안하는 시스템을 PSIM 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 태양광 컨버터 및 밸런싱 회로

그림1은 태양광 발전 전압이 승압되어 밸런싱 과정을 거쳐 직류배전망으로 전달되는 전반적인 시스템 구성을 나타내고 있다. 태양광(PV) 측에서 나온 전력은 풀브릿지 초퍼부를 통해 변압기 2차 측으로 전달된다. 이때 LLC 회로 구성을 통해 소프트 스위칭 가능하다. 변압기 2차 측에는 doubler 형태로 커패시터 구성하여 출력 전압을 2배로 가져갈 수 있도록 하였다.

출력단 뒤쪽에 하프브릿지 회로와 인덕터 구성을 가진 전압 밸런싱 회로를 구성하였다.

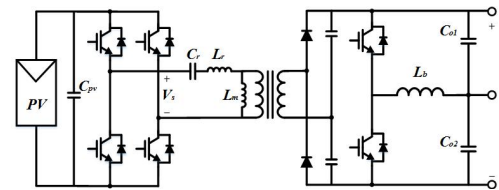


그림 1. 제안하는 시스템 토폴로지

2.1 태양광 MPPT 제어

제안하는 시스템에서 PV를 통해 발전된 전력은 P&O(Perturb & Observe) 알고리즘을 이용한 MPPT 제어를 통해 최대 전력을 얻도록 하였다.

전반적인 제어로는 태양광 출력 전압과 전류를 측정 받아 이에 대한 전력을 계산하고 이전 측정 값과 비교하여 전력 변화율 dP 와 전압 변화율 dV 를 얻는다. 전압, 전력 변화율이 0보다 크거나 작을 경우에 따라 제어하는 전압 지령 값을 변화시키면서 항상 최대 전력을 추종하게끔 전압 제어를 수행하였다.

2.2 공진형 컨버터 설계

전반적인 LLC 공진형 컨버터 설계 과정은 공진형 컨버터의 공진주파수 f_r , Q factor, m 값을 먼저 선정한다. 선정된 값은 각각 수식 (1) 에서와 같이 정의되므로 이에 따라 L_r , L_m , C_r 값을 결정할 수 있게 된다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, \quad Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{ac}}, \quad m = \frac{L_r + L_m}{L_r} \quad (1)$$

LLC 공진형 회로에서의 전압 이득 K 는 수식(2)와 같이 정의된다.

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \lambda - \frac{\lambda}{f_n^2}\right)^2 + Q^2\left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{m-1} = \frac{L_r}{L_m}, f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (3)$$

이때, 스위칭 주파수와 공진 주파수의 비인 f_n 과 전압 이득 K 사이 관계를 통해 스위치의 ZVS 영역과 ZCS 영역을 결정할 수 있으며 이를 이용하여 스위칭 주파수를 결정할 수 있다. f_n 과 K 사이의 관계는 그림 2와 같다.

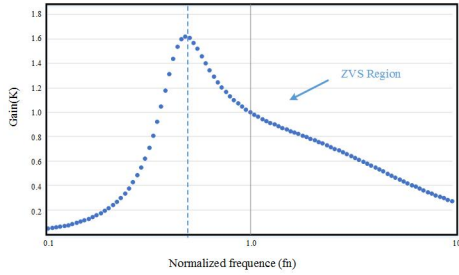
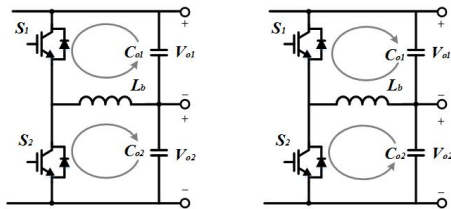


그림 2. 스위칭 주파수에 따른 게인 값 그래프

안정적인 ZVS 스위칭이 이루어지기 위해서는 그림 2에서처럼 공진점 이후 영역으로 스위칭 주파수를 선정하여 제어를 수행해야 한다. 본 논문에서는 ZVS 영역 중 공진주파수와 스위칭 주파수가 같아지는 f_n 이 1이 되는 지점에서 스위칭 주파수를 선정하였다.

2.3 밸런싱 회로

양극성 배전망 출력 전압 V_{o1} 과 V_{o2} 는 750Vdc 전압차를 가진다. 그림 3에서와 같은 구성을 통해 배전망 전압을 일정하게 유지할 수 있다. 만약 배전망 V_{o1} 의 출력 전압이 V_{o2} 에 비해 더 큰 값을 가질 경우 그림 3 (a)에서처럼 스위치 S_1 이 작동하면서 C_{o1} 의 전압이 방전되고 C_{o2} 로 전압이 충전되게 된다. 반대로 전압 V_{o2} 값이 더 클 경우 그림 3 (b)에서처럼 스위치 S_2 가 작동하여 C_{o2} 에서는 전압이 방전되고 C_{o1} 에서는 충전되어 배전망 전압이 750Vdc로 유지시킬 수 있다. 이때 인덕터 L_b 를 통해 충 방전 시 발생 하는 리플을 저감시킬 수 있다.



(a) $V_{o1} > V_{o2}$ (b) $V_{o1} < V_{o2}$
그림 3. 밸런싱 회로 동작 모드

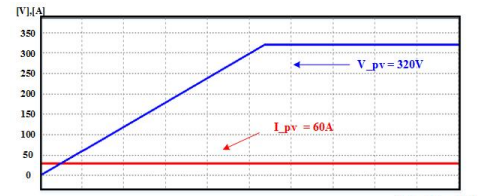
3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 시스템 정격 용량 20kW에 태양광 측 전압 320V를 출력단인 직류 배전망 측에 ± 750 V로 승압하도록 하였다. LLC 공진 회로에서 공진주파수를 100kHz로 Q factor를 0.35로 m 값은 5.5로 선정하였고 식 (1)의

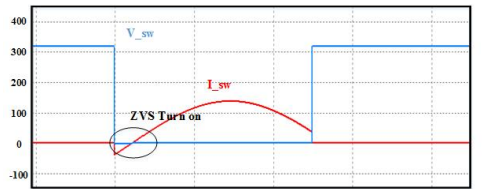
계산에 따라 L_r 은 $2.32\mu H$, L_m 은 $10.40\mu H$, C_r 은 $1.01\mu F$ 로 설계하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

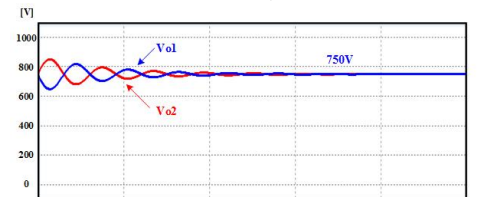
정격 용량	20kW	Q -factor	0.35
태양광 측 전압	320V	m	5.5
스위칭주파수	100kHz	L_r	$2.32\mu H$
C_r	$1.01\mu F$	L_m	$10.40\mu H$



(a) 태양광 출력 전압, 전류



(b) 스위치 전압, 도통 전류



(c) 양극성 배전망에서의 출력 전압

그림 4. 시뮬레이션 결과 파형

그림 4의 시뮬레이션 결과를 통해 (a)에서 태양광 출력 전압이 증가하다 최대 출력 전력 발생하는 320V 전압에서 일정하게 제어됨을 확인할 수 있다. (b)에서 스위치 턴 온 시 영 전압에서 스위칭 되는 것을 확인할 수 있다. (c)에서 배전망 전압 V_{o1} 과 V_{o2} 간 전압 불 평형이 발생하여도 다시 750 Vdc로 제어됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광 제어와 공진형 컨버터를 통한 스위칭 손실 저감 그리고 양극성 직류배전망 연결에서의 밸런싱 회로 제어에 대한 전반적인 설계 및 제어를 제안하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 이러한 종합적인 제어의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No.20164030200980)

참고 문헌

[1] C. Buccella, C. Cecati, H. Latefa, K. Razi, "A Grid Connected PV System with LLC Resonant DC DC Converter" ICCEP 2013 International conference, pp. 777 782, 2013.