

DC 계통연계형 태양광 PCS 개발

윤여영, 김홍성, 최재호*
한빛이디에스(주), 충북대학교*

Development of DC grid-connected Photovoltaic PCS

Yeo-Young Yoon, Hong-Sung Kim, Jaeho Choi*
Hanbit EDS CO., Ltd, Chungbuk National University*

ABSTRACT

본 논문에서는 DC 계통연계형 태양광 PCS 개발에 대해서 다루고 있다. 개발된 DC 계통연계형 태양광 PCS 시스템의 전력회로 구성, 전력회로 동작원리, Fixed Frequency Series Resonant DC/DC Converter 출력 전압 제어 원리 및 제어기 구성에 대해서 살펴보고, 시뮬레이션 및 제작된 시스템의 실험 결과를 통해 개발된 시스템의 타당성을 입증하였다.

1. 서론

최근 지구 온난화와 화석에너지의 고갈 및 온실가스 배출에 의한 환경문제에 대한 해결책으로 다양한 신재생 에너지원 기반 분산전원의 수요가 증가와 더불어 미래혁신적인 전력공급 분야 기술인 마이크로그리드에 대한 연구가 주목 받고 있다.

마이크로 그리드 시스템은 집중적 전력공급 시스템의 단점인 전력 송전 손실, 전자파 장애를 해결할 수 있고, 전력품질 향상, 피크부하 해결 솔루션의 장점을 갖고 있다. 마이크로 그리드는 크게 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드로 분류되며, 대표적인 직류 전원을 소비하는 디지털 부하는 미국 전력연구센터(EPR)에 의하면 2020년에는 부하의 50%를 디지털 부하가 차지할 것으로 예상되는 등 급속한 증가 추세를 보이고 있으며, 또한 DC 출력형 신재생 에너지의 수요 증가, 한국형 스마트 그리드 로드맵에서도 저압 DC 마이크로 그리드 시스템에 대한 연구개발이 명시 되는 등 DC 마이크로그리드에 대한 연구 개발이 활발하게 이뤄지고 있다.

DC 마이크로그리드 시스템이 갖는 장점으로는 AC 마이크로 그리드 시스템과 달리 동기화, 안정도, 무효전력 소모 등의 단점이 없다. 또한 DC 소비형 디지털 부하 및 태양광, 연료전지 등 DC 출력형 분산전원들은 DC 계통 연계 시 AC 계통 연계 시 때보다 DC/AC 전력 변환부가 생략되어, AC 계통 연계 시 보다 4~15% 정도의 전력 손실 절감을 할 수 있다.^[1]

위와 같은 이유로 DC 마이크로그리드 시스템 보급은 확산 될 것으로 예상되며, 이에 따른 DC 계통연계형 PCS 개발도 필요하다. DC 계통연계형 PCS의 DC/DC 컨버터는 승압형 컨버터로만 되어있는 AC 계통연계형 PCS 와 달리 승·강압 모드가 가능해야 한다. 그 이유는 DC 계통 전압이 일정한 특성을 갖는 점, 태양전지 전압 출력 폭이 큰 점 및 아직 저압 DC 계통의 표준 전압이 정해져 있지 않기 때문에 적용 범위를 넓게 갖기 위해서이다. 이에 본 연구에서 개발된 DC 계통연계형 태양

광 인버터는 승·강압 모드 운전 및 ZVZCS 운전이 가능한 Fixed Frequency Series Resonant Converter 시스템을 적용하였다. 개발된 PCS의 성능을 확인하기 위하여, 시뮬레이션 및 제작된 25[kW] PCS로 정격운전 실험 및 출력 급변 과도상태 성능 분석 실험들을 진행하였다.

2. 본론

2.1 시스템 전력회로 구성 및 동작 원리

그림1 에 개발된 25[kW] DC 계통연계형 태양광 PCS의 전력회로를 나타내었다. 개발된 시스템은 고주파 펄스 변압기를 사용하여 입·출력을 절연하여, 전기적 시스템 안정성을 확보 하였으며, PWM 기법으로는 그림 2의 위상 천이 PWM 기법을 사용하였다. 위상천이 PWM 기법의 동작원리는 그림 2를 보면 Q3, Q4 는 각각 Q1, Q2 와 보수 동작을 하게 되며, Q1, Q3 스위칭 신호를 고정 시킨 상태에서 Q2, Q4의 스위칭 신호의 위상을 변화시켜 듀티비 조절을 통해 출력 전압을 제어한다. Q1, Q3에서는 영전압 상태에서 스위치가 턴온하여 ZVS 동작을 수행하며, Q2, Q4에서는 스위치가 영전류 상태에서 턴오프하여 ZCS 동작을 수행하여 스위칭 손실을 절감시킨다.^[2]

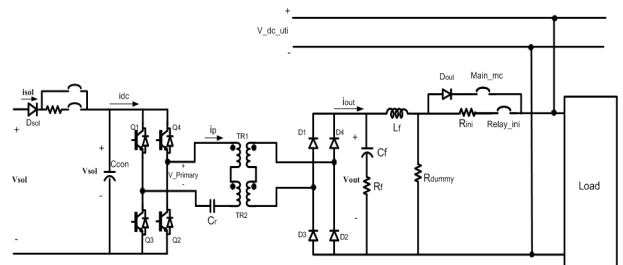


그림 1 25[kW] DC 계통연계형 태양광 PCS 전력회로

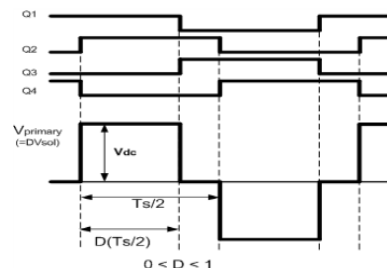


그림 2 위상 천이 PWM 기법

2.2 Fixed Frequency SR Converter 출력 전압 제어 원리 및 제어기 구성

고정 주파수 직렬 공진 컨버터의 출력 특성을 해석하기 위한 AC 등가회로를 그림 3에 나타내었다. 전압이득(출력전압의 크기/ 입력전압의 크기) M은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \left| \frac{Z_3 R_{ac}}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3} \right| \quad (1) \quad \text{여}$$

기서 $R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o$ 이다. 식(1)을 풀어 정리하면, 전압 이득M은 다음 식 (2)와 같이 주파수 함수 형태로 표현 할 수 있다.

$$V_o = M \frac{V_{primary}}{N} \quad (2)$$

$$= \frac{V_{primary}}{N} \left| \frac{\left(\frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right) \frac{k}{k+1}}{j\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}\right) \cdot Q \frac{(k+1)^2}{2k+1} + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)} \right|$$

$$k = \frac{L_m}{L_{lkp}}, \quad Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{ac}},$$

$$L_p = L_m + L_{lkp}, \quad L_r = L_{lkp} + L_m / (n^2 L_{lks})$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_r}}$$

그림 4는 공진주파수 $f_o = (\omega_o / 2\pi)$ 가 20K[hz]일 경우 K와 Q에 따른 전압이득 곡선을 나타내고 있다. 식 (2)를 통해 부하 변동 시 Q(quality factor)값이 변화하나, 스위칭 주파수의 고정 시 이득 M은 고정됨을 그림 4를 통해 알 수 있다. 그러므로 전력회로 스위칭 주파수 고정 시 Duty Ratio 제어를 통해 출력전압 제어가 가능함을 식(2)를 통해 알 수 있다.^[3]

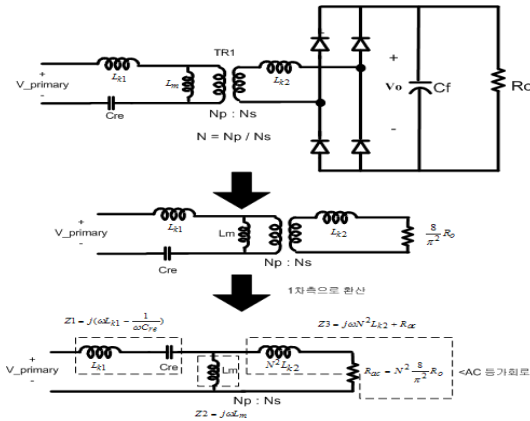
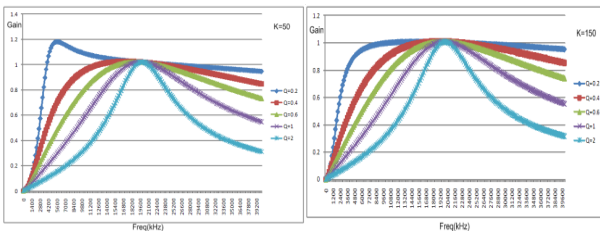


그림 3 고정주파수 직렬 공진형 회로 AC 등가회로



(a) K = 50

(b) K = 150

그림 4 K와 Q에 따른 전압 이득 그래프

그림 5는 시스템의 디지털 제어기 블록선도이다. MPPT, PI 제어기, Modulator 등으로 구성되었고, 제어기 H/W는 TI사의

DSP인 TMS320F2835로 구현하였다.

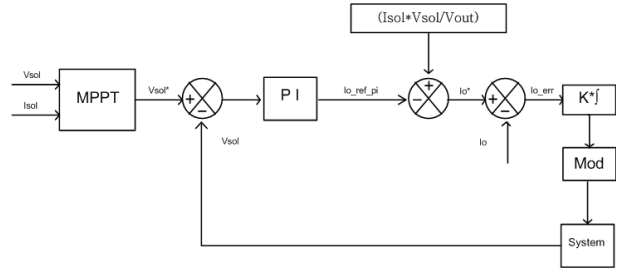


그림 5 시스템 제어 블록도

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 Powersim Inc.의 Psim Tool을 이용하여 수행하였으며, 시뮬레이션 및 실험에 사용한 Tr Parameter 값 및 공진 Capacitor 값을 표1에 나타내었다. 그림 6은 50[%] 운전 조건에서 시스템의 스위칭 파형(Q1~Q4), 스위칭 출력전압(V_primary), 스위칭 출력전류(Ip), 시스템 출력 전압(Vout)을 시뮬레이션한 결과 파형이다. 그림 7 (a)의 결과와 비교 분석해보면 튜비 증가와 더불어 Q1, Q3에 Q2, Q4가 겹치는 영역이 증가하며, 이에 따라 V-primary 파형과 Ip 파형의 변화를 확인할 수 있다. 그림 7. (a)~(c)를 통해 입력전압 조건의 변화에 따른 각 부 파형의 차이를 확인할 수 있다. 그림 8. (a)~(c)는 시뮬레이션과 같은 조건으로 실험한 결과 파형으로 시뮬레이션 결과 파형과 유사함을 확인할 수 있다.

표 1 Tr Parameter 값 및 공진 Capacitor 값

Tr Turn Ratio	1.5(24 : 36)	Tr L_p	1.78mH
f_o : 공진 주파수	20 KHz	Tr L_r	19.7uH
f_s : 스위칭 주파수	20 KHz	Tr L_{lkp}	9.85uH
C_r	3.22uF	Tr L_{lks}	21.3uH
K / Q	180 / 0.4	Rload	14.4

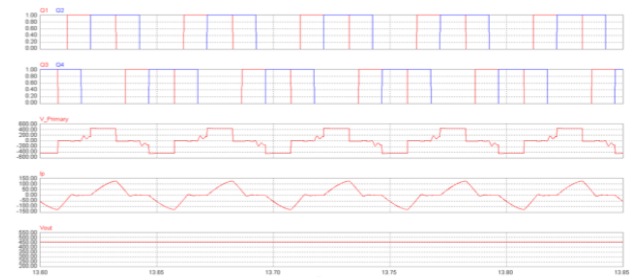
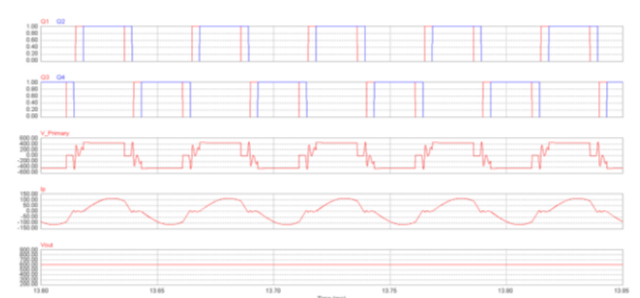
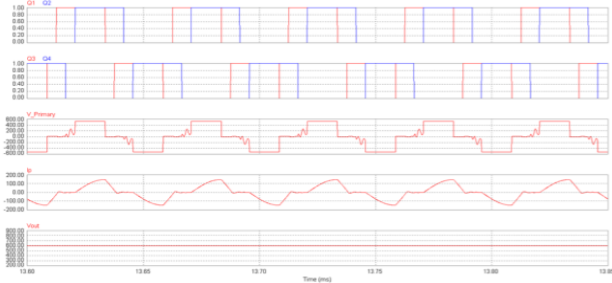


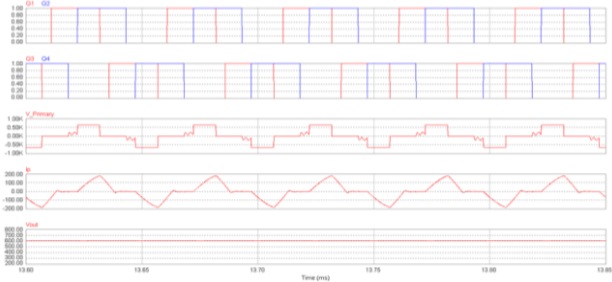
그림 6 입력전압 450[V], 출력전압 450[V] 조건에서 스위칭파형(Q1-Q4), 스위칭 출력전압(V_primary), 스위칭 출력 전류(Ip), 시스템 출력전압(Vout) 시뮬레이션 결과



(a) 입력전압 450[V], 출력전압 605[V]

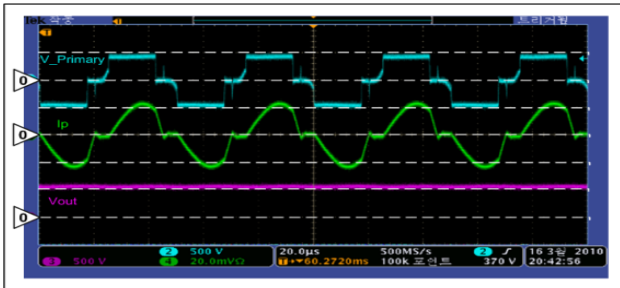


(b) 입력전압 530[V], 출력전압 605[V]

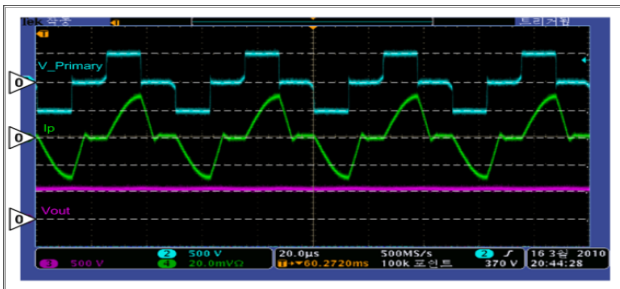


(c) 입력전압 650[V], 출력전압 605[V]

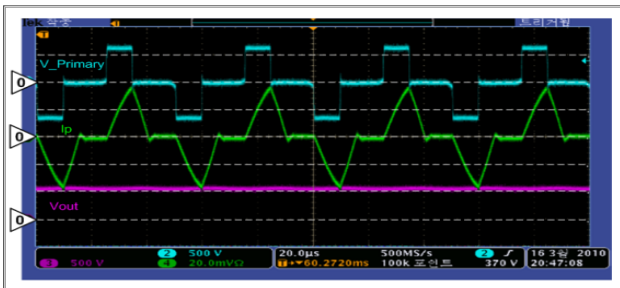
그림 7 정격 25[kW]시 입력조건 변화에 따른 스위칭파형(Q1-Q4), 스위칭 출력전압 (V_{primary}), 스위칭 출력 전류(I_p), 시스템 출력전압(V_{out}) 시뮬레이션 결과



(a) 입력전압 450[V], 출력전압 605[V]



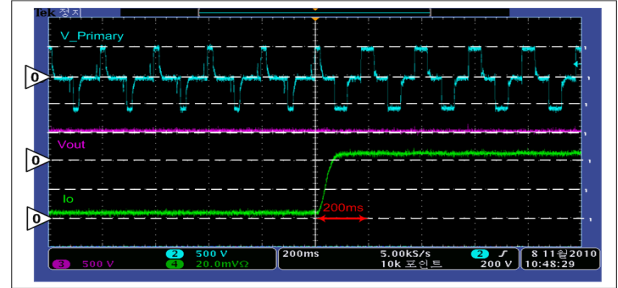
(b) 입력전압 450[V], 출력전압 605[V]



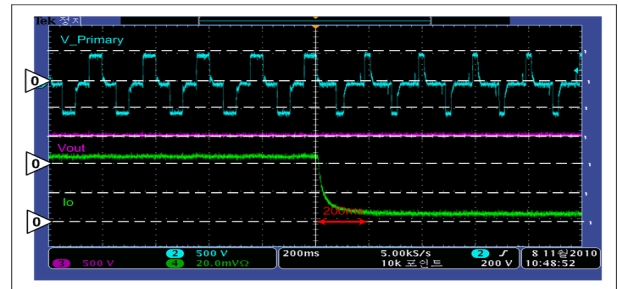
(c) 입력전압 650[V], 출력전압 605[V]

그림 8 정격 25[kW]시 입력조건 변화에 따른 스위칭 출력전압 (V_{primary} [500V/div]), 스위칭 출력 전류(I_p [100A/div]), 시스템 출력전압(V_{out} [500V/div]) 실험결과

그림 9는 출력변동 과도 상태를 확인하기 위해 입력전압 조건 550[V]에서 그림 9.(a)는 출력을 10%에서 100%로 그림 9.(b)는 출력을 100%에서 10%로 변동시킨 실험파형이다. 두 조건 모두 100[ms] 이내로 정상상태가 됨을 확인 할 수 있다.



(a) 출력 변동 조건 10[%] -> 100[%]



(b) 출력 변동 조건 100[%] -> 10[%]

그림 9 입력전압 550[V] 조건에서 시스템 출력 급변 실험 파형 스위칭 출력전압(V_{primary} [500V/div]), 출력 전류(I_o [20A/div]), 시스템 출력전압(V_{out} [500V/div])

4. 결론

본 논문에서는 DC 계통 전압이 일정한 특성을 갖는 점, 태양전지 전압 출력 폭이 큰 점 및 아직 저압 DC 계통의 표준 전압이 정해져 있지 않다는 점을 고려하여, 모든 조건에서 적용 범위를 넓게 갖기 위해 DC 계통연계형 태양광 PCS의 DC/DC Converter를 승·강압 모드 운전 및 ZVZCS 운전이 가능한 Fixed Frequency Series Resonant Converter 시스템을 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 시스템의 승·강압 모드 운전 성능을 확인 하였다. 또한 태양광 발전시스템 출력 변동 최단 시간은 10초 이내로, 개발된 시스템의 출력변동 실험결과 과도상태에서 정상상태로 변하는 시간은 100[ms] 이내로 시스템 전류 제어기 성능이 태양광 발전시스템에 적용 가능함을 확인 하였다.

이 논문은 중소기업청(S1059426) 기술 혁신 개발 사업의 연구비 지원에 의하여 연구 되었음

참고 문헌

- [1] "分散電源による特定區域への直流多端子配電システム構成の研究開発," 株式会社日立製作所 보고서, 2004.
- [2] J.a Sabate, F.C. Lee, "Offline Application of the Fixed Frequency Clamped Mode Series-Resonant Converter" proceedings of APEC, 1989.
- [3] 최향석 "Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter" Journal of Power Electronics, Vol. 7, No. 1, January 2007.