

SR 컨버터 기반 25[kW]급 DC 계통연계 태양광 PCS 개발

윤여영, 김홍성, 정재기
한빛이디에스(주)

Development of Series Resonant Converter Based DC Utility Interactive PCS for 25[kW] PV System

Yeo-Young Yoon, Hong-Sung Kim, Jae-Kee Jeong
Hanbit EDS CO., Ltd

ABSTRACT

본 논문은 DC 급전시스템에 적용 가능한 25[kW]급 계통연계 태양광 PCS 개발에 관한 것이다. 전력 회로는 넓은 범위의 입력 전압대에서 출력 전류가 조절 가능 하도록 Fixed Frequency Series Resonant Converter(SR Converter)로 구성하였으며, 스위칭 손실을 극소화시킬 수 있는 ZVZCS 동작을 구현하였으며, PWM 기법으로는 위상 천이 방식을 사용하였다. 제안한 DC 계통 연계형 태양광 PCS 시스템 동작에 대한 P-sim 시뮬레이션을 수행하였으며, 25[kW] Prototype을 제작하여 시뮬레이션 결과와 비교 실험을 수행하였다.

1. 서론

전 세계적으로 환경 문제 및 화석 에너지의 고갈과 맞물려 DC 출력형 신재생 에너지의 수요는 증가 일로에 있으며, 정보화 사회의 진보와 더불어 IDC(Internet Data Center)로 대표되는 DC 부하인 컴퓨터 네트워크의 설치양도 급속한 증가 추세에 있다. 또한 최근 발표된 한국형 스마트 그리드 로드맵에서도 저압 DC배전 시스템에 대한 연구 개발이 명시되어 그에 대한 연구 개발이 활발히 이뤄지고 있다. DC 급전 계통이 갖고 있는 장점으로는 AC 급전계통에 내재되어있는 단점인 동기화, 안정도 무효전력 소모 등을 해결할 수 있으며, 컴퓨터 네트워크와 같은 DC부하들은 현재 대부분 AC계통으로부터 전력을 공급 받으므로 각 기기는 AC/DC 변환기를 구비하고 있으며, 태양전지, 연료전지 등의 직류 출력형 분산전원 장치를 교류 계통에 연계하기 위해서도 DC/DC/AC 변환 장치를 이용하게 된다. 이에 반해 DC 급전 계통의 구성시는 DC/AC 변환 과정 및 각 DC 부하기기에 구비되어 있는 AC/DC 변환기가 생략될 수 있으므로 AC 배전 방식에 비해 약 4~15[%] 정도의 전력 손실 감소를 기대할 수 있다.^{[1][2][3]}

위와 같이 저압 DC배전 시스템 보급이 확산됨을 가정하면 이에 따른 DC 계통 연계형 PCS 개발이 필요하다. 현재 일반적인 AC계통 연계형 PCS용 DC/DC 컨버터의 경우 승압형 컨버터 구조로 되어있다. 하지만 DC 계통 연계형 DC/DC 컨버터는 직류 계통 전압이 일정한 특성상 DC/DC 컨버터가 승·강압 모드로 운전이 가능해야 적용 범위가 넓을 것으로 예상된다.

이러한 승·강압 모드로 운전이 가능한 적절한 DC/DC Converter 시스템으로는 Zero Voltage Switching(ZVS) PWM FB DC/DC Converter, Zero Voltage Zero Current Switching(ZVZCS) PWM FB DC/DC Converter, Fixed

Frequency SR Converter 시스템 등이 있다. ZVS PWM FB DC/DC Converter 같은 경우 변압기 누설 인덕터, 전력소자의 정전 캐패시터 및 스너버 캐패시터와 같은 회로의 기생요소를 이용함으로써 스위칭이 ZVS 상태에서 이뤄지며, 이로 인해 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 하지만 ZVS 동작 범위가 누설 인덕터의 크기에 의해 결정 되므로 경부하시 ZVS 동작을 하기 위해 상대적으로 큰 누설 인덕터가 요구되며, freewheeling 기간에 변압기와 스위칭 소자간에 순환전류가 흘러 전류 손실과 도통 손실을 증가 시키며, 부하의존 출력 특성, Duty 손실 및 2차측 ringing 현상 등의 단점이 있다. ZVZCS PWM FB DC/DC Converter는 간단한 보조 회로를 첨가함으로써 ZVS Type의 단점인 순환전류를 줄일 수 있지만 변압기 2차측에 ringing 현상에 의한 과전압 발생, 복잡한 회로 구성, Duty 손실 등의 단점이 있다.^{[4][5][6][7]}

본 논문에서는 ZVZCS 운전이 가능한 Fixed Frequency SR Converter 시스템을 선정했으며, TI사의 TMS320F28335 DSP를 이용하여 출력 전류 제어용 디지털 전류 제어기를 개발하였다. 개발된 PCS 시스템의 디지털 전류제어기의 성능을 확인하기 위하여 25[kW] Prototype을 제작하여 시스템의 정격 운전 실험 및 출력 변동 과도상태 성능 분석 실험 등을 수행하였다.

2. 본론

2.1 시스템 입·출력 사양결정

2.1.1 입력 사양 결정

태양광 모듈은 S사 232[W]급을 선정하여, 18직렬 × 24병렬 적용 ($18 \times 6 \times 232[W] = 25056[kW]$)하여 시스템의 입력전압을 결정하였다. 선정된 태양광 모듈의 V_{mp} 는 표준 조건($25^{\circ}C$, $1000W/m^2$)에서 29.2[V]이므로 PV-array의 정격 MPP(Maximum Power Point) 전압은 $29.2 \times 18 = 525.6[V]$, 모듈의 개방전압은 37.3[V]이므로 PV-array의 Open 전압은 671.4[V]이다. 상온을 영상 25도라 하고, 태양광 모듈 온도 적용 범위를 $-25^{\circ}C \sim 75^{\circ}C$ 로 고려하면, 태양광 모듈의 Temperature coefficient는 $-0.32\%/^{\circ}C$ ^[8]로 가정하면 MPP window 범위는 $525.6[V] \times 0.84 \sim 525.6[V] \times 1.16 = 441[V] \sim 610[V]$ 정도이고, 입력 최대전압은 $671.4 \times 1.16 = 780[V]$ 이다. 위와 같은 조건하에 입력 전압 사양은 526[V] 정격에 MPPT(Maximum Power Point Tracking)범위는 440[V] ~ 610[V]로 선정될 수 있다.

2.1.2 출력 사양 결정

현재 DC 마이크로그리드는 동작 전압의 규격이 설정되어 있지 않으므로, [3] 임의로 아래와 같이 시스템의 출력 전압 사양을 결정하였다. 우리나라 저압기준은 직류(DC)는 750[V]이하, 교류(AC)는 650[V]이하이며, 대부분의 빌딩 배전 시스템은 저압 시스템임을 고려, 3상 380[V] AC전원을 다이오드 브리지 정류기를 통하여 DC로 변환하여 장비에 입력한다고 가정하면, 삼상 다이오드 정류기 출력 DC 전압의 평균치는

$$V_{dc-nominal} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\pi} = 513[V] \text{이므로 } 520[V] \text{를}$$

Nominal 전압으로 가정하고 본 연구에서는 시스템의 출력 전압 범위를 468[V] ~ 572[V](520[V] ± 0.1[PU])로 선정하였다.

2.2 시스템 전력 회로 구성 및 동작원리

SR 컨버터 기반 25[kW]급 DC 계통 연계 태양광 PCS 시스템의 전력 회로 구성을 그림1에 나타냈다. 제안된 태양광 PCS 시스템은 고주파 펄스변압기를 사용하여 절연함으로써 전기적 시스템 안정성을 확보 하였으며, PWM 기법으로는 위상천이 방식을 사용하였다. 스위치 Q3, Q4는 Q1, Q2와 각 각 보수로 동작 하며, Q1, Q3의 스위칭 신호는 고정시킨 상태에서 Q2, Q4의 스위칭 신호를 의도적으로 위상을 이동하여 듀티비를 조정하여 출력을 제어하게 된다. 이때 Q1, Q3는 영전압상태에서 턴온하여 ZVS동작을, Q2, Q4는 영전류 상태에서 턴오프하여 ZCS동작을 한다 [9].

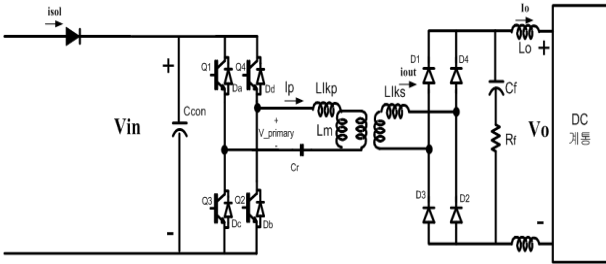


그림 1 Fixed Frequency SR Converter 전력회로

2.3 전압이득

그림1과 같은 SR 컨버터의 전압이득 M은 다음과 같다[10].

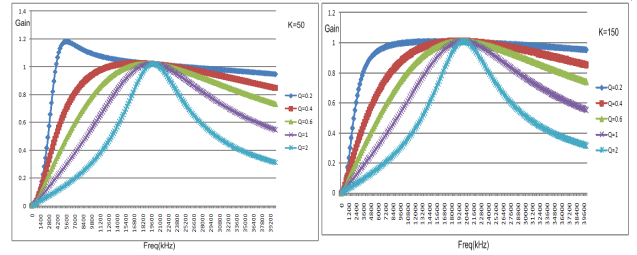
$$M = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}} = \frac{\left(\frac{\omega^2}{\omega_p^2} \right) \frac{k}{k+1}}{j \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2} \right) \cdot Q \frac{(k+1)^2}{2k+1} + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \right)}$$

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

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o, L_p = L_m + L_{lkp}, L_r = L_{lkp} + L_m / (n^2 L_{lks})$$

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

K와 Q 값에 따른 주파수와 전압이득의 관계를 그림2에 나타내었다(공진 주파수:20[kHz]).



(a) K=50 인 경우 (b) K=150 인 경우
그림 2 K와 Q에 따른 전압 이득 그래프

2.4 디지털 제어기 설계

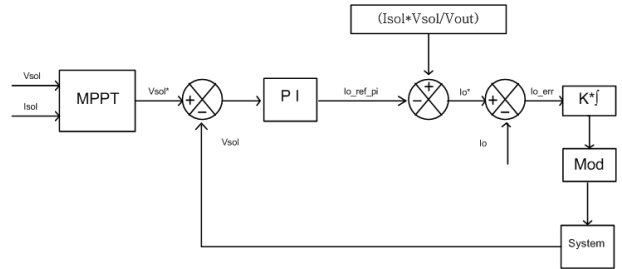


그림 3 시스템 제어 블록도

본 논문에서는 DC 계통에 전력을 공급하는 시스템의 출력 전류(그림1에서 I_o)를 제어하기 위해 그림 3과 같이 MPPT, PI 제어기, Modulator 등으로 구성된 디지털 전류 제어기를 설계하였다. 제어기 H/W는 TI 사의 DSP TMS320F2835로 제작하였으며, 위상천이 방식 구현, 입력력 과전류 및 과전압 보호 기능 등을 구현하였다

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 4는 제안된 시스템 시험회로이며, 표 1은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 시스템 파라미터 값 들을 나타낸다.

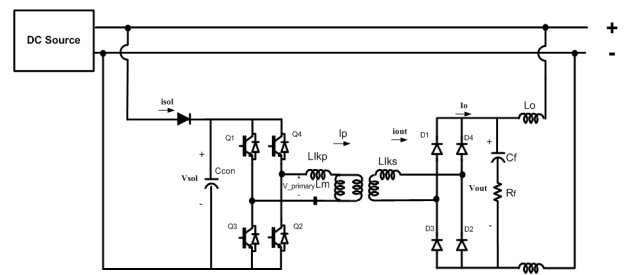


그림 4 시스템 시험 회로(전압 : DC 550[V])

표 1 시스템 파라미터 값
Table 1 System Parameter Value

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	180	Q	0.4

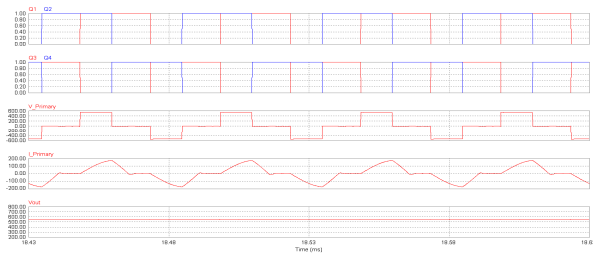


그림 5 25[kW] 정격-Input 550[V], Output 550[V], V_primary, I_primary 파형

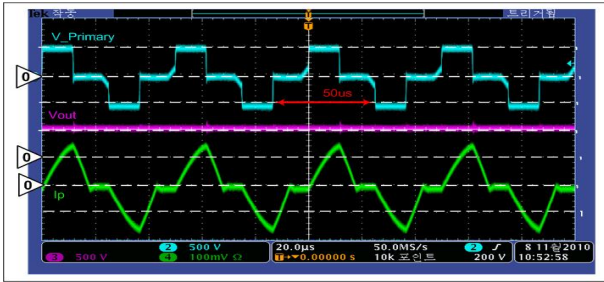


그림 6 25[kW]정격 운전 - $f_s=20$ [KHz], Input Voltage=550[V], Output Voltage=550[V] V_primary[500V/div], Ip[100A/div], Vout[500V/div]

그림 5는 550[V] 입력조건에서 25[kW] 정격 운전 시 파형이며, 그림 6은 25[kW] Prototype 실험 파형이다. 그림 7.8은 출력변동 과도 상태를 알아보기 위한 시험으로 그림 7은 전류를 5[A]에서 46[A]로, 그림 8은 전류를 46[A]에서 5[A]로 변화시켰을 때 파형이다. 두 경우 모두 0.1[Sec]이내에 정상상태로 들어감을 확인 할 수 있다.

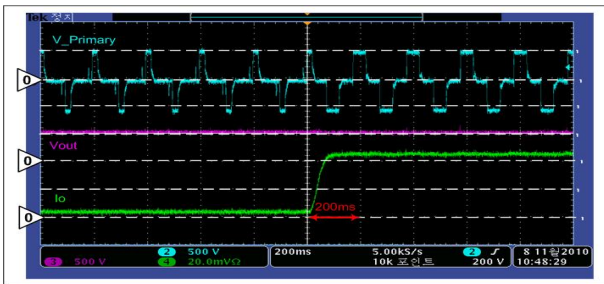


그림 7. 550V입력 조건에서 부하전류 5[A] → 46[A] 변화 시 파형 (출력변동 조건 : 10[%] → 100[%])
위로부터 V_primary[500V/div], Vout[500V/div], Io[20A/div]

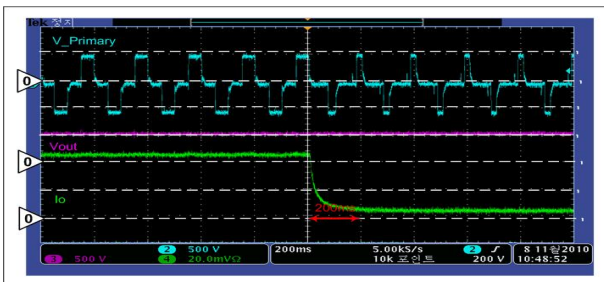


그림 8. 550V입력 조건에서 부하전류 46[A] → 5[A] 변화 시 파형 (출력변동 조건 : 100[%] → 10[%])
위로부터 V_primary[500V/div], Vout[500V/div], Io[20A/div]

4. 결론

본 논문에서는 ZVZCS 동작이 가능한 절연형 Fixed Frequency SR Converter를 이용한 DC 계통 연계형 태양광 PCS를 제안하였다. 출력 전류를 제어하여 출력을 제어하는 전류제어기를 설계하였으며 TI사의 TMS320F28335를 이용하여 제어기를 구현하였다. 시뮬레이션 및 25[kW] Prototype을 제작하여 정격 운전 시험과 출력 변동 과도상태 특성을 확인하였다. 10[%]→100[%], 100[%]→10[%] 출력제어 시 과도상태에서 정상상태로 들어가는 시간은 0.1[Sec]이내였다. 태양광 발전 시스템의 출력 변동이 최단 10초 정도의 속도로 변화함을 고려하면 개발한 전류제어기는 태양광 발전 시스템용으로 적용 가능함을 확인하였다^[11].

이 논문은 중소 기업청(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] Neil Rasmussen, “AC vs DC Power Distribution for Data Center,” American Power Conversion, 2006.
- [3] 한병문, 이지현, “DC 마이크로그리드의 동작해석 시뮬레이션 모델” 전력전자 학회지 2010.04.
- [4] J.A. Sabate, V. Vlatkovic, R.B. Ridley, F. C Lee, F and B.H Cho, “Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter ” Power Electronics Conference Proceedings of The IEEE 1990, pp275 - 284.
- [5] Eun-Soo Kim, Yoon-Ho Kim, “A ZVZCS PWM FB DC/DC Converter Using a Modified EnergyRecovery Snubber” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2002.10, pp1120-1127.
- [6] 권경환, 오승훈, 이귀준, 현동석, “ZVS 범위 최적화를 위한 새로운 위상 천이 폴-브릿지 컨버터” 전력전자학회 2009년도 하계학술대회 논문집 2009.7, pp. 130-132.
- [7] J.G CHO, J.W Baek, C.Y Jeong, D.W YOO, K.Y Joe, “Novel Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Full Bridge PWM Converter Using Transformer Auxiliary Winding” Power Electronics, IEEE Transactions on 2000.3 pp. 250-257.
- [8] SM-232MC0 232 watt Photovoltaic Module Datasheet
- [9] J.a Sabate, F.C. Lee, “Offline Application of the Fixed Frequency Clamped Mode Series-Resonant Converter” roceedings of APEC, 1989.
- [10] 최향식 “Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter” Journal of Power Electronics, Vol. 7, No. 1, January 2007.
- [11] 태양광발전시스템의有効利用方策の検討, 日本電力中央研究所 報告書, T97515, 1998年, PP.4.