스위칭방식 PV Simulator의 전력회로와 LCL필터 설계

이성민*, 김두환*, 유태식*, 김효성*, 오성진**
공주대학교 전기전자제어공학부*, 카코 뉴에너지(주)**

A Design of Power Circuit and LCL Filter for Switching Mode PV Simulator

Sungmin Lee*, Duhwan Kim*, Taesik Yu*, Hyosung Kim*, Seongjin Oh**
School of EE and control Engineering, Kongju National University*, KACO newenergy**

ABSTRACT

PV Simulator는 제한된 작업공간에서 태양광발전계통의 주요 설비인 Power Conditioning System (PCS)의 성능을 평가하거나, 제품 출하 전 PCS의 고장유무를 검사하는데 필수적인 장비이다. 최근에 IEC에서 EN50530규정에 따라 PCS의 MPPT평가도 중요하게 되어 동특성이 우수한 PV Simulator가 요구되고 있다.

현재 출시되고 있는 PV Simulator는 대부분 리니어 방식으로서 안정된 출력을 갖지만 효율이 나쁘다는 단점이 있다. 본 논문에서는 효율을 높이기 위한 스위칭 방식 PV Simulator의 전력회로와 출력용 LCL필터를 설계하고 그 특성을 검증한다.

1. 서론

태양광 발전을 위하여 PV array를 설치하기 위하여는 통상적으로 kW당 약 $2m^2$의 완전히 개방된 공간이 요구된다. 또한 PV array의 출력은 기후환경에 영향을 받으므로, 원하는 기상조건에 대하여 자유롭게 PCS의 성능을 시험할 수 없다.

PV Simulator는 상대적으로 kW당 $0.1m^2$ 이하의 작은 실내 공간으로 충분하며, 자유롭게 기후환경조건에 따른 PCS의 운전 성능을 시험할 수 있다. 또한 PV array까지 연결해야 하는 긴 거리의 DC cable이 필요하지 않으므로, Cable에서의 전압강하나 전력손실이 없이 높은 신뢰성으로 장기간의 기후환경조건에 따른 PCS의 성능시험도 가능하다. 더욱이 PV Simulator와 PCS간에 내부적으로 전력의 수수가 가능하므로 그리드에 주입시키는 전력을 최소화 시킬 수가 있어서, 실험 시 그리드에 미치는 영향을 줄일 수 있다.

PV Simulator는 PCS의 성능을 평가하는데 사용되기도 하지만, 제조사에서 PCS를 출하하기 전 고장유무를 테스트하기 위한 검사를 하는데도 사용된다. 유럽시장에 판매하기 위한 PCS는 EN50530규정에 따라 정적 MPPT 평가뿐만 아니라 동적 MPPT 평가도 준수할 것이 요구 되고 있어서, 이러한 동적 MPPT 시험이 가능한 우수한 PV Simulator가 요구되고 있다.

PV Simulator자체가 소비하는 전력도 중요한 요소이다. 기존의 PV Simulator는 고성능의 기능을 구현하는 것을 주목적으로 하여 리니어 방식을 채용하므로서, 큰 규모의 냉각장치가 요구되어 제품의 사이즈가 커지고 전력소모가 많았다. 본 논문에서는 전력변환 효율이 높은 스위칭방식에 의한 PV Simulator의 전력회로를 제시한다. 스위칭방식 PV Simulator는 리니어 방식에 비하여 효율이 높다는 장점이 있으나, 출력전류에 리플이 높게 함유될 수 있다. 본 논문에서는 출력전류 리플을 줄이기 위하여 LCL필터를 채택하여 출력전류 및 전압의 리플을 최소화 시킬 수 있는 LCL필터의 설계 가이드라인을 제시하고 실험을 통하여 증명한다.

2. PV Simulator의 구성

그림 1에 개발하고자하는 PV Simulator장치의 전력회로 구성을 보인다. PWM컨버터에 의하여 삼상교류를 직류로 변환한다. 직류링크에 연결된 3대의 Buck형 DC DC 컨버터에 의하여 각각의

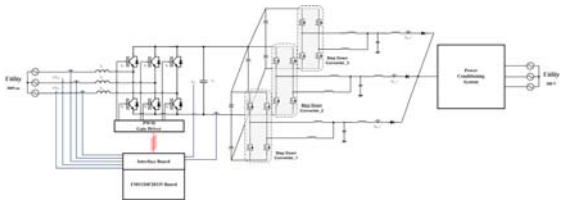
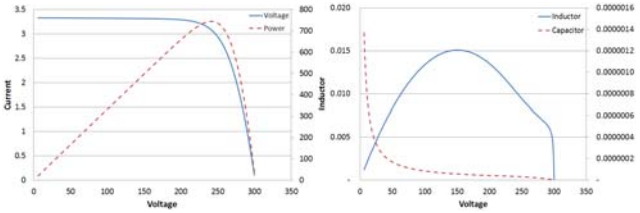


그림 1 PV Simulator의 전력회로 개념

표 1 개발대상 PV Simulator의 사양

항 목		사 양
Power		3kW
Input Source	Voltage	100Vac(3 Phase), 90~110V(±10%)
	Current	30A(@100Vac), Max 33.3A(@90Vac)
Output	Voltage	0~300V(전압리플<3%)
	Current	0~10A(전류리플<3%)
2 Leg Buck Converter	Power	1kW*3
	Voltage	300Vdc, 0~300V(전압리플<3%)
	Current	3.3A(@300Vdc), 0~3.3A(전류리플<3%)



(a) 특성곡선 (b) 출력 측 L-C필터 설계결과

그림 2 PV Simulator의 특성곡선과 이에 따른 출력 측 L-C필터 설계결과

PV Simulation을 수행 한다. DC DC컨버터는 표준형 H브리지 스택을 사용하여 인터리빙 형태로 동작하므로, 개발이 간단하고 필터 인덕터의 사이즈를 줄일 수 있다. 3대의 DC DC컨버터는 독립적으로 운전이 가능하므로 다중의 MPP를 갖는 PV array의 동작을 모사할 수 있다. 표 1에 개발하고자 하는 PV Simulator의 사양을 보인다.

3. PV Simulator의 출력 LCL필터 설계

3-1 LC 필터 설계

Buck 컨버터의 필터 설계 방법은 다음과 같다. 우선, 인덕터 전압 V_L을 구하여 식 (1)과 같이 필터인덕터 값을 구한다.

$$L = \frac{V_o(1-D)T}{\Delta I_L} = \frac{(V_i - V_o)DT}{\Delta I_L} \quad (1)$$

출력전압의 Ripple(3%이내)을 고려하여 식 (2)와 같이 필터커패시터를 선정한다.

$$C = \frac{\Delta I_L}{8\Delta V_o f_{sw}} \quad (2)$$

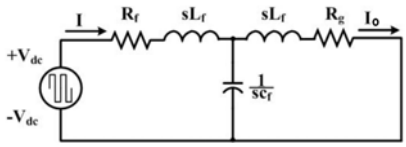
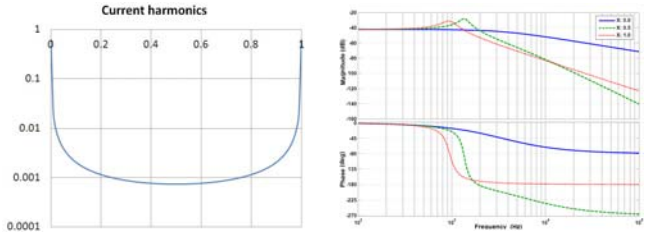


그림 3 출력측 LCL필터의 고조파 등가회로



(a) (b)

그림 4 (a) Filter inductor의 분리에 따른 부하고조파성분전류의 크기
(b) Filter inductor의 분리계수에 따른 출력 측 LCL필터의 주파수 특성
(X:(0.0, 0.5, 1.0), Rg:130[ohm], L:6[mH], C:4.7[uF], fc:850[Hz])

일반적인 Buck컨버터는 출력전압이 변하지 않기 때문에 위의 필터 설계 식에 의해 인덕터와 커패시터 값을 선정 할 수 있다. 하지만 PV Simulator의 출력전압은 그림 2 (a)와 같이 0~300V 사이에서 임의로 변하기 때문에 정확한 필터 설계를 위하여 그림 2 (b)와 같이 각 전압과 전류에 따른 L C 필터 설계 값을 계산한다. 그에 따른 설계 값은 L_f 6mH, C_f 4.7uF이다.

3-2 LCL 필터 설계

3.2.1 출력 고조파전류의 기본전달함수

LCL 구조의 필터는 LC 구조의 필터와 같은 필터용량에 대하여 더 높은 필터효과를 볼 수 있다. 그림 3은 출력 측 LCL필터의 고조파 등가회로를 보인다. 그림 3에 기초하여 PWM전압 노이즈에 대한 출력전류의 전달함수는 수식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{I_o}{V} = \frac{1}{s^3 L_f L_g C_f + s^2 L_f C_f R_g + s L_f + s L_g + R_g} \tag{3}$$

$L = L_f + L_g$ Constant 의 조건에서, 분리계수 x를 적용하여 $L_f = xL$, $L_g = (1-x)L$로 치환하면($0 \le x \le 1$),

$$\left|\frac{I_o}{V}\right| = \frac{1}{s^3(xL^2C_f - x^2L^2C_f) + s^2 xLC_f R_g + sL + R_g} \tag{4}$$

따라서 분리계수 x에 대한 고조파전류응답은 다음식과 같이 표현 된다.

$$\left|\frac{I_o}{V}\right|_{s=j\omega} = \frac{1}{\left\{R_g^2(1-\omega^2 xLC_f)^2 + \omega^2 L^2(\omega^2 xLC_f - \omega^2 x^2 LC_f - 1)^2\right\}^{1/2}} \tag{5}$$

그림 4 (a)는 분리계수 x에 대한 스위칭주파수대에서 LCL필터의 고조파전류응답을 보인다. 그림 4 (a)에서 알 수 있는 것처럼 분리계수가 $x = 0.5$일 때 고조파전류가 가장 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 출력 측 LCL필터의 설계 값은 L_f 3mH, C_f 4.7uF, L_g 3mH이다. 그림 4 (b)는 분리계수 x에 대한 필터의 보드선도를 보인다.

4. 실험

그림 5는 출력 측 필터의 성능을 평가하기 위한 실험장치의 구성을 보인다. 50kHz로 스위칭 하는 FET를 사용하여 DC DC 변환 전력회로를 구축하였고, TMS320F28335 DSP를 사용한 제어보드로 PV cell simulation제어를 수행한다. 제어보드는 10kHz의 샘플링 주파수로 동작하며 FET스택에 50kHz의 PWM 출력을 보내어 직류출력단 전류에 따른 출력단전압을 제어한다.

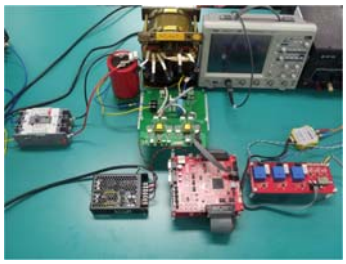
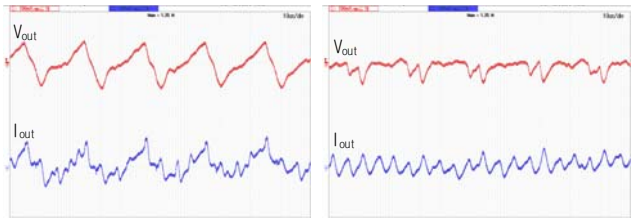


그림 5 실험 장치 구성도



(a) L-C filter(L:6mH, C:4.7uF) (b) L-C-L filter(L:3mH, C:4.7uF, L:3mH)

그림 6 실험결과 파형(10us/TimeDiv, 100mv/VoltDiv)

표 2 실험 결과

Parameter		L C filter	L C L filter
Ripple (%)	Voltage	192mV (0.08%)	101mV (0.04%)
	Current	49.5mA (2.68%)	31.25mA (1.69%)

그림 6과 표 2는 실험결과를 보인다. 실험 결과 리플값이 LC필터에 비하여 LCL필터의 경우가 전압은 약 2배, 전류는 약 1.6배 정도 작게 되는 것을 볼 수 있다. 전류 측정 시 전류프로브로 측정이 되지 않으므로 LEM사의 HAS 100 Hole current sensor를 이용하여 측정하였다.

5. 결론

본 논문에서는 스위칭방식 PV Simulator를 위한 전력회로를 설계하였고, 출력 전압 및 전류의 리플을 감소시키기 위한 LCL 구조의 필터 설계 방법과 설계 데이터를 제시하였다. 실험을 통하여 제안된 LCL필터는 같은 필터 용량을 갖는 LC필터에 비하여 전압은 약 2배가량 전류는 약 1.6배가량 리플 감소효과가 있음을 증명하였다. 향후 LCL필터의 성능을 더욱 높이는 연구를 수행할 것이다.

이 논문은 2011년 교육과학기술로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/에너지 자립형 그린빌리지핵심기술사업단)
이 논문은 (주) 카코 뉴에너지의 연구비 지원을 받아 수행되었슴

참 고 문 헌

[1] M.Liserre, F.Blaabjerg, S.Hansen, “Design and control of an LCL filterbasedthree phaseactiverectifier,” IEEE Trans. on Ind.App., Vol.38, No.2, pp.299 307, 2001.
[2] F.M.P. Hidalgo, J.R.H. Larmbia, J.L.D. Pat, ”Ripple reduction in DC line of a PWM drive by direct reinjectionTrans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 4, pp. 971 973, 2000.
[3] Hyosung Kim, Seung Ki Sul, “A Novel Filter Design for Output LC Filters of PWM Inverters,” Journal of Power Electronics, KIPE(Korean Institute of Power Electronics), vol.11, no.1, pp.74~81, Jan. 2011.