

스위칭방식 PV Simulator의 전력회로와 LCL필터 설계

이성민¹, 유태식¹, 김호성[†]

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

Sung-Min Lee¹, Tae-Sik Yu¹, and Hyosung Kim[†]

Abstract - PV simulators are essential equipment for testing power conditioning systems (PCS) which are one of an important part in PV generator systems, for testing before shipment. High dynamic PV simulator is required since MPPT(Maximum Power Point Tracking) test procedure has been established by EN50530 regulation recently. Most high quality PV simulator prevailed in the market is linear type which however has low efficiency. This paper proposes design guide lines for the power stage and LCL type filter cooperating with a switching mode PV simulator that shows high efficiency and very low power consumption. Proposed theory is verified by experiment.

Keywords: switching mode, PV simulator, power circuit, LCL filter, MPPT(Maximum Power Point Tracking)

1. 서 론

태양광 발전용 PV array를 설치하기 위해서 통상적으로 kW당 약 2m²의 완전히 개방된 공간이 요구된다. 또한 PV array의 출력은 기후환경에 영향을 받으므로, 원하는 기상조건에 대하여 자유롭게 PCS의 성능을 시험할 수 없다.

PV simulator는 상대적으로 kW당 0.1m² 이하의 작은 실내 공간으로 충분하며, 자유롭게 기후환경조건에 따른 PCS의 운전성능을 시험할 수 있다. 또한 PV array까지 연결해야 하는 긴 거리의 DC 케이블이 필요하지 않으므로, Cable에서의 전압강하나 전력손실이 없이 높은 신뢰성으로, 장기간의 기후환경조건에 따른 PCS의 성능시험도 가능하다.

PV simulator는 PCS의 성능을 평가하는데 사용되기도 하지만, 제조사에서 PCS를 출하하기 전 고장유무를 테스트하기 위한 검사를 하는데도 사용된다. 계통연계형 PCS의 경우 IEEE 1547 “Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems” 규정에 따른 시험을 위하여 PV simulator가 요구된다^[1]. 유럽시장에 판매

하기 위한 PCS는 EN50530규정 “Overall efficiency of photovoltaic inverters”에 따라 정적 MPPT 평가뿐만 아니라 시간에 따라 다양한 패턴을 갖는 일사량 조건에 대한 동적 MPPT 평가도 준수할 것이 요구 되고 있으며, 규소결정형 PV cell 뿐만 아니라 아몰퍼스 박막형 PV cell에 대한 MPPT 시험이 가능하여야 한다^[2]. 따라서 이러한 다양한 시험을 수행할 수 있는 고성능의 PV simulator가 요구되고 있다.

PV simulator 자체가 소비하는 전력도 중요한 요소이다. 기존의 PV simulator는 고성능의 기능을 구현하는 것을 주목적으로 하여 리니어 방식을 채용하므로 전력용 스위치에서의 전력손실이 많이 발생하여 효율이 나쁘고, 큰 규모의 냉각장치가 요구되어 제품의 사이즈가 커지는 단점이 있다^[3,4].

본 논문에서는 전력변환 효율이 높은 스위칭방식에 의한 PV simulator의 전력회로를 제시한다. 제안된 방식은 PV simulator와 PCS간에 내부적으로 전력의 수수가 가능하므로 그리드에 주입시키는 전력을 최소화시킬 수가 있어서, 운전에 따르는 소비전력을 혁신적으로 감소시킬 수 있다^[5].

이와 같이 스위칭방식 PV simulator는 리니어 방식에 비하여 효율이 높다는 장점이 있으나, 직류측 출력전류에 리플이 높게 함유될 수 있다^[6,7]. EN50530 규정에 따르면 PV simulator는 0.9V_{MPP}-1.1V_{MPP} 사이에서 전압과 전류의 오차가 1%이상 나지 말아야 한다. 또한 MPP(Maximum Power Point)에서 전력 P_{MPP}은 0.1%이

Paper number: TKPE-2012-17-5-8 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

¹ Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received May 21, 2012; accepted Aug. 30, 2012

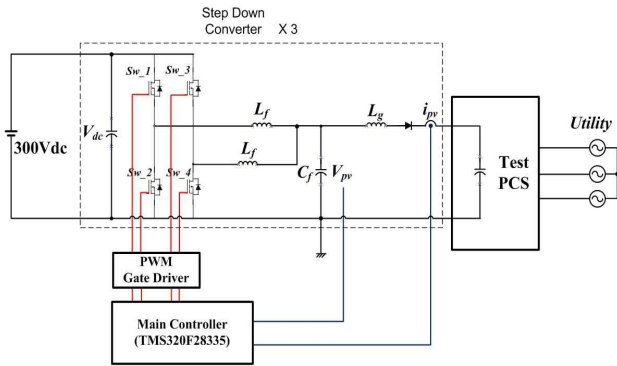


Fig. 1 Power stage concept of proposed PV simulator

Table 1 Specification of proposed PV simulator

Parameters		Value
Power		3kW
Input Source	Voltage	100Vac(3 Phase), 90~110V(±10%)
	Current	30A(@100V _{AC}), Max 33.3A(@90V _{AC})
Output	Voltage	0~300V _{DC} (Voltage Ripple<3%)
	Current	0~10A(Current Ripple<3%)
2-Leg Buck Converter	Power	1kW*3
	Voltage	300V _{DC} , 0~300V _{DC} (Voltage Ripple<0.05%)
	Current	3.3A, 0~3.3A(Current Ripple<0.05%)

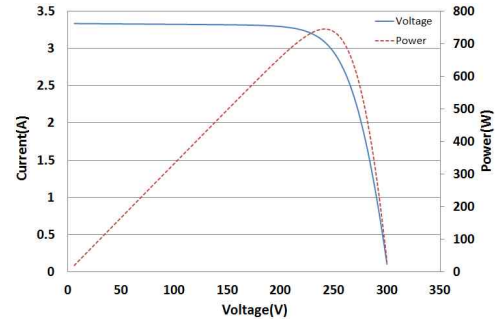
상의 오차가 발생해서는 안 된다^[2]. 이를 만족하기 위하여 PV simulator의 직류 출력측 전류 및 전압 리플은 적어도 0.05% 이내로 억제되어야 한다. 본 논문에서는 직류출력전류 리플을 줄이기 위하여 직류용 LCL필터를 채택하여 전력회로를 설계하고, 직류용 LCL필터의 설계 가이드라인을 제시하며 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명 한다.

2. PV simulator의 직류용 LCL필터 설계

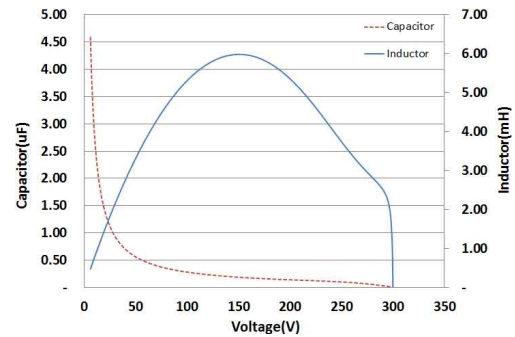
2.1 PV simulator의 구성

그림 1에 개발하고자하는 PV simulator장치의 전력회로 구성을 보인다. PWM컨버터에 의하여 3상 교류를 직류로 변환한다. 본 논문에서는 PWM컨버터 대신에 편이상 실험을 단순화하기 위하여 300V 직류전원을 사용한다.

PV simulator는 300V 직류링크에 연결된 2레그-인터리브 구조의 Buck 컨버터에 의하여 설정된 PV array model에 해당되는 전압-전류 출력을 모사한다. 즉, Buck 컨버터는 Test PCS에서 사용하는 입력전류 i_{pv} 에 대응하는 PV array model의 출력전압 V_{pv} 를 유지하도록 제어된다. Buck 컨버터는 표준형 H브리지 스택을 사용하여 인터리빙 형태로 동작하므로, 개발이 간단하고 필터 인덕터의 사이즈를 줄일 수 있다. 그림 1의 점선으로 표



(a) Characteristic curve



(b) Output side L-C filter design results

Fig. 2 L-C Filter design result and the characteristic curve of PV array

시한 사각형 내에 있는 H브리지 스택을 사용한 2레그-인터리브 구조의 Buck 컨버터 3대를 병렬 운전함으로써 다중의 MPP를 갖는 PV array의 동작을 모사할 수 있다. 표 1에 개발하고자 하는 PV simulator의 사양을 보인다.

Buck 컨버터는 리니어 컨버터에 비하여 효율은 좋으나, 직류 출력측 전압과 전류에 스위칭리플 성분이 많이 함유되므로 EN50530규정에 따른 전류 및 전압 정밀도를 확보하기 위한 고성능의 평활용 직류필터가 필요하다.

2.2 직류용 LC 필터 설계

Buck 컨버터의 전형적인 직류용 LC필터 설계 방법은 다음과 같다. 우선 입력전압과 출력전압을 이용하여 식 (1)과 같이 듀티를 계산한다.

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (1)$$

인덕터 전압 V_{L_f} 을 구하여 식 (2)와 같이 인덕턴스를 구한다.

$$L_{fB} = \frac{V_o(1-D)T}{\Delta I_L} = \frac{(V_i - V_o)DT}{\Delta I_L} \quad (2)$$

출력전압의 Ripple(0.05%이내)을 고려하여 식(3)과 같

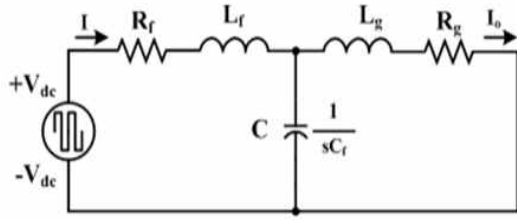


Fig. 3 Harmonic equivalent circuit for output LCL filter

이 커패시터를 선정한다.

$$C_{fB} = \frac{\Delta I_L}{8\Delta V_o f_{sw}} \quad (3)$$

일반적인 Buck 컨버터는 출력전압이 변하지 않기 때문에 위와 같은 필터설계 식에 의해 인덕터와 커패시터 값을 선정 할 수 있다. 하지만 PV simulator의 출력전압은 그림 2(a)와 같이 0~300V_{DC} 사이에서 임의로 변하기 때문에 Buck 컨버터의 전채운전영역에 적용되는 필터 값을 설계할 필요가 있다. 따라서 그림 2(b)와 같이 Buck 컨버터의 운전전압과 운전전류를 고려한 직류용 LC필터설계 값을 계산한다. 그에 따른 설계 값은 $L_f = 6mH$, $C_f = 4.7\mu F$ 이다.

2.3 직류용 LCL 필터 설계

Test PCS의 입력단은 매우 큰 용량의 평활용 커패시터를 가지므로, PV simulator용 Buck 컨버터의 출력단을 LC필터 구조로 하는 것은 문제가 된다. 왜냐하면 LC필터의 필터커패시터 C_f 와 PCS의 입력단 평활용 커패시터 C 가 병렬로 접속되어 동작되므로 Test PCS의 접속에 따라 PV simulator의 동특성이 영향을 받게 되며, 초기 운전시 큰 용량의 입력단 평활용 커패시터 C 에 흐르는 돌입전류의 문제가 발생한다. 따라서 LC필터의 필터커패시터 C_f 와 PCS의 입력단 평활용 커패시터 C 를 분리시키기 위하여 디커플링용 인덕터가 필요하다. 그러므로 PV simulator용 Buck 컨버터의 출력단 필터는 LCL 구조의 필터가 된다.

또한 LCL 구조의 필터는 LC 구조의 필터와 같은 필터용량에 대하여 더 높은 필터효과를 볼 수 있다^[8,13].

그림 3은 직류 출력측 LCL필터의 고조파 등가회로를 보인다. 그림 3에 기초하여 PWM전압 노이즈에 대한 출력전류의 전달함수는 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{I_o}{V} = \frac{1}{s^3 L_f L_g C_f + s^2 L_f C_f R_g + s L_f + s L_g + R_g} \quad (4)$$

본 논문에서는 직류 출력측 LCL필터의 설계를 체계적으로 수행하기 위하여 분리계수의 개념을 고안하였다.

$L_{fB} = L_f + L_g = \text{Constant}$ 의 조건에서, 분리계수 x 를

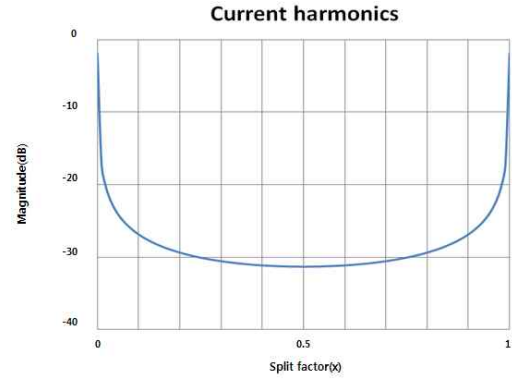


Fig. 4 The magnitude of harmonic current component according to the separation factor of the filter inductor

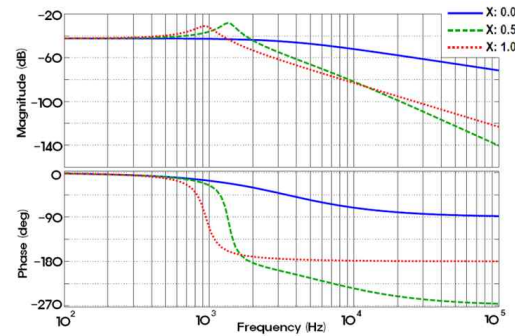


Fig. 5 The frequency response of harmonic current component according to the separation factor of the filter inductor; $X=(0.0, 0.5, 1.0)$, $R=130[\text{ohm}]$, $L=6[\text{mH}]$, $C=4.7[\mu F]$, $f_c=850[\text{Hz}]$

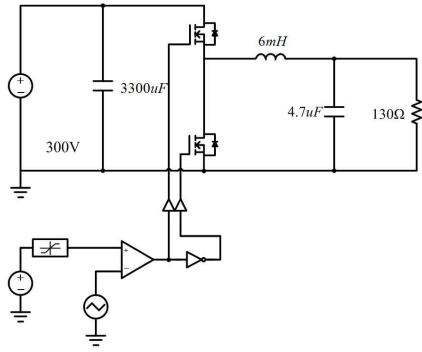
적용하여 $L_f = xL_{fB}$, $L_g = (1-x)L_{fB}$ 로 치환하면 수식(5)와 같이 정리 할 수 있다.(단, $0 \leq x \leq 1$)

$$\left| \frac{I_o}{V} \right| = \frac{1}{s^3 (xL_{fB}^2 C_f - x^2 L_{fB}^2 C_f) + s^2 xL_{fB} C_f R_g + sL_{fB} + R_g} \quad (5)$$

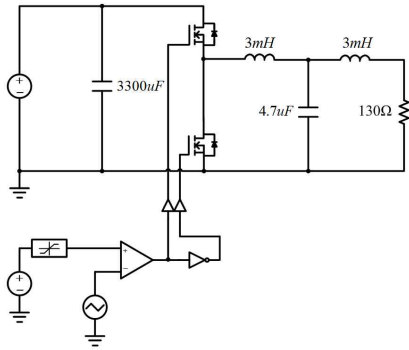
따라서 분리계수 x 에 대한 부하고조파전류응답은 식(6)과 같이 표현 된다.

$$\left| \frac{I_o}{V} \right|_{s=j\omega} = \frac{1}{\{R_g^2(1 - \omega^2 xL_{fB} C_f)^2 + \omega^2 L_{fB}^2 (\omega^2 xL_{fB} C_f - \omega^2 x^2 L_{fB} C_f - 1)^2\}^{1/2}} \quad (6)$$

그림 4는 분리계수 x 에 대한 스위칭주파수대에서 직류 출력측 LCL필터의 고조파전류응답을 보인다. 그림 4에서 알 수 있는 것처럼 분리계수 $x=0.5$ 일 때 고조파전류가 가장 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 직류 출력측 LCL필터의 설계 값은 $L_f = 3mH$, $C_f = 4.7\mu F$, $L_g = 3mH$ 이다. 그림 5는 필터 인덕터의 분리계수에 따른 직류 출력측 LCL필터의 주파수 특성 보드선도를 보인다. 보드선도에서 보이는 바와 같이 스위칭 주파수가 50kHz일 때 분리계수 $x=0.5$ 가 가장 좋은 것으로 나타났다.



(a) LC filter circuit



(b) LCL filter circuit

Fig. 6 Simulation model

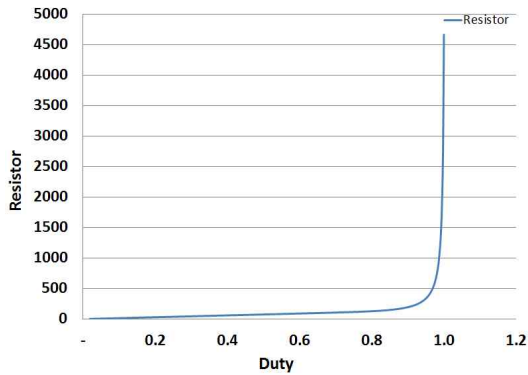


Fig. 7 Equivalent load resistance on duty ratio

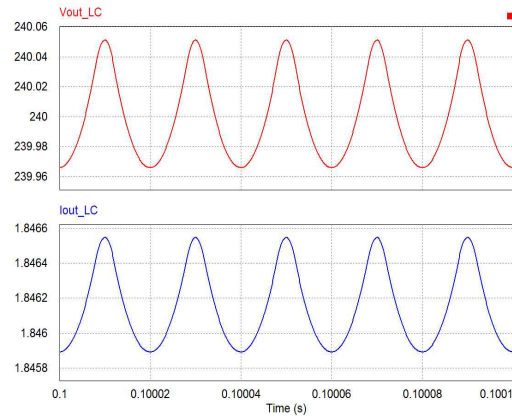
LCL필터의 타당한 설계를 위한 분리계수의 범위는 $0.3 < x < 0.7$ 가 적당할 것으로 보인다.

3. 시뮬레이션

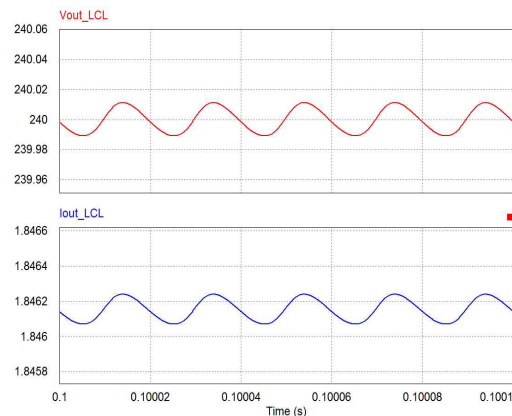
그림 6은 DC-DC 컨버터의 출력측 필터의 성능을 평가하기 위한 PSIM시뮬레이션 회로도를 보인다. 그림 6a)는 직류 출력측 LC필터의 성능을 평가하기 위한 모델이고 그림 6b)는 직류 출력측 LCL필터의 성능을 평가하기 위한 모델이다. 출력단의 PCS는 등가저항으로 모델링하였다.

Table 2 Simulation and experiment conditions

Parameters	LC filter	LCL filter
V_{in}	300V _{DC}	
V_{out}	240V _{DC}	
I_{out}	1.84A	
f_{sw}	50kHz	
$Duty$	0.8(MPP)	
R_{mpp}	130Ω	
L_f	6mH	3mH
C_f	4.7µF	4.7µF
L_g	-	3mH



(a) LC filter



(b) LCL filter

Fig. 8 Simulation result waveform

그림 7은 DC-DC 컨버터의 듀티비에 따른 PCS모델의 등가저항을 계산한 결과를 보인다. 계산 결과에 따라 MPP에서 듀티비=0.8 등가저항=130Ω이다. 표 2는 시뮬레이션과 실험조건이다. 부하조건은 최대전력이 출력되는 조건($R_{mpp}=130Ω$)으로 하였고, 필터 값은 앞 절에서 설계한 값을 적용하였다. 그림 8은 시뮬레이션 결과 파형을 보인다.

Table 3 Simulation result

Parameters		LC filter	LCL filter
Ripple (%)	Voltage	85.14mV (0.035%)	22.08mV (0.009%)
	Current	0.65uA (0.035%)	0.17uA (0.009%)

Table 4 Experiment result

Parameters		LC filter	LCL filter
Ripple (%)	Voltage	174mV (0.072%)	115mV (0.04%)
	Current	452uA (0.024%)	222uA (0.012%)

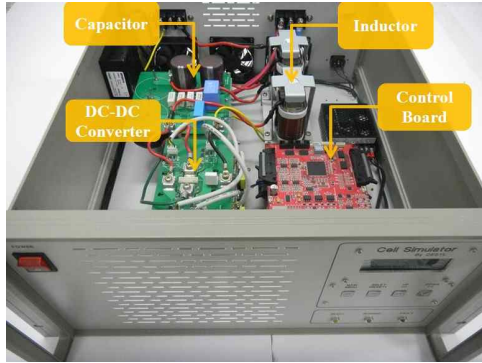
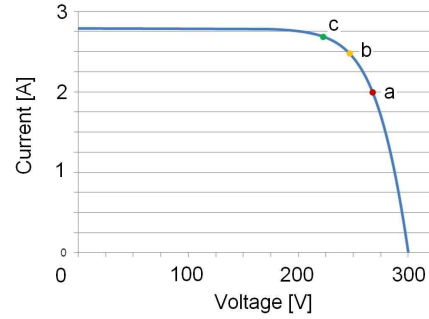
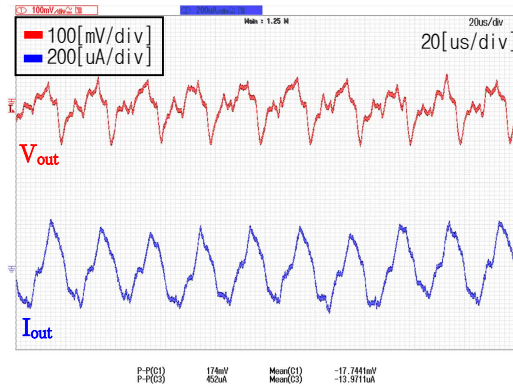


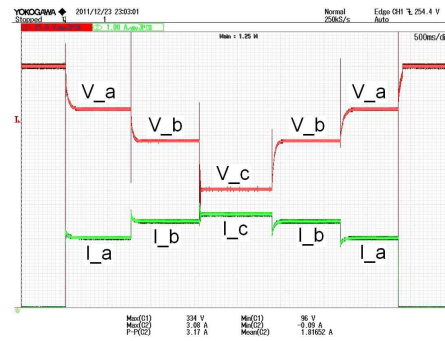
Fig. 9 Photo of the experiment system



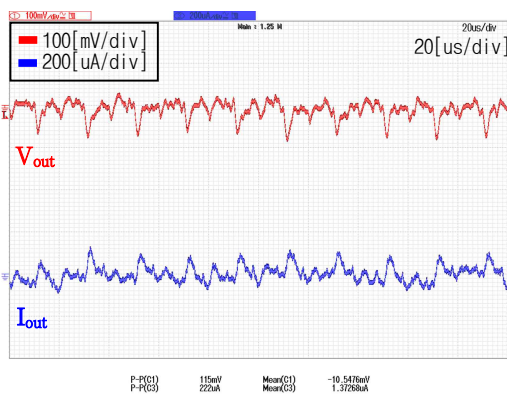
(a) I-V curve



(a) LC filter(L:6mH, C:4.7uF)



(b) Step response of proposed simulator (25V/Div, 1A/Div, 500ms/Div)



(b) LCL filter(L:3mH, C:4.7uF, L:3mH)

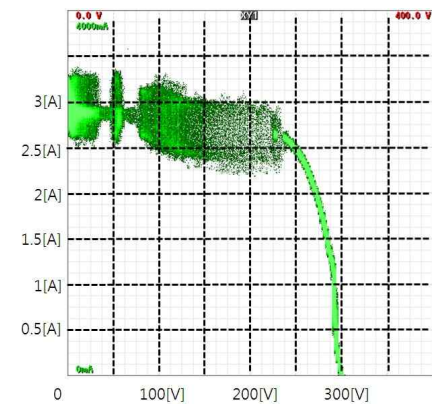


Fig. 12 Experiment of I-V curve of the pilot PV simulator

Fig. 10 Experiment result(100mV/Div, 200uA/Div, 20us/Div)

시뮬레이션 결과로는 전압 및 전류의 파형은 같은 형태이지만 리플의 크기가 대략 4배의 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 표 3은 시뮬레이션 결과 값을 정리하였다.

4. 실험

그림 9는 출력측 필터의 성능을 평가하기 위한 실험 장치의 외관을 보인다. 50kHz로 스위칭 하는 FET를 사

용하여 DC-DC 변환 전력회로를 구축하였고, TMS320 F28335 DSP를 사용한 제어보드로 PV simulator의 제어를 수행한다. 제어보드는 10kHz의 샘플링 주파수로 동작하며 FET스택에 50kHz의 PWM출력을 보내어 직류 출력 전류에 따른 출력전압을 제어한다.

그림 10은 실험결과와 파형을 보인다. 표 4에 실험결과 값을 정리하였다. 실험결과는 LC필터에 비하여 LCL필터의 경우가 직류 출력측 리플값이 전압은 약 2배, 전류는 약 1.6배 정도 작은 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션과 달리 실험에서 LCL필터의 효과가 줄어드는 이유는 FET의 스위칭시 발생하는 서지에 의해 LCL필터가 공진하는 현상에 기인하는 것으로 보인다. 전류 측정 시 전류프로브로 측정이 되지 않으므로 LEM사의 HAS-100 Hole current sensor를 이용하여 측정하였다.

그림 11은 제작된 PV simulator의 I-V curve 운전특성을 보인다. 그림 11a)는 PV simulator가 출력하여야 할 목표 I-V curve와 그 중 본 논문에서 시험할 3개의 운전점 (a, b, c)을 표시하였다. 3개의 운전점은 MPP를 포함하도록 선정하였다. 그림 11b)는 선정된 3개의 운전점 (a, b, c)에서 PV simulator의 동적운전특성을 보인다. 150[ms]이내에 목표 I-V curve의 3개 운전점을 모두 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.

그림 12는 제작된 PV simulator의 전체 전압운전영역에서의 I-V 특성커브를 보인다. MPP보다 높은 전압영역에서 전류출력은 양호하지만 MPP보다 낮은 전압영역에서 전류출력이 불안정한 부분이 존재한다. 그 이유는 실험에서 사용한 전류센서의 오차범위가 커서 전류제어기의 동작에 진동을 야기하는 것으로 판단된다. 이는 추후 PV simulator의 제어기설계에 관한 연구를 통하여 해결하고자 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 스위칭방식 PV simulator를 위한 전력회로를 설계하였고, EN50530규정에 의거하여 직류측 출력전압 및 전류의 리플을 감소시키기 위한 LCL구조 직류 출력필터의 체계적인 설계 방법과 설계 데이터를 제시하였다. 고조파등가회로 분석을 통하여 PV simulator의 직류 출력측 LCL필터의 성능을 향상시키기 위한 분리계수의 범위는 $0.3 < x < 0.7$ 인 것을 증명 하였다. 실험을 통하여 제안된 직류 출력측 LCL필터는 같은 필터용량을 갖는 LC필터에 비하여 전압은 약 2배가량 전류는 약 1.6배가량 리플 감소효과가 있음을 확인하였다.

이 논문은 (주) 카코 뉴에너지의 연구비 지원을 받아 수행되었음. 이 논문은 공주대학교의 자체 학술연구비 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] IEEE 1547 Std. 1547-2003, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY.
- [2] IEC EN50530 Standard for Overall efficiency of photovoltaic inverters, CENELEC, Stassart 35, B-1050 Brussels.
- [3] S.Gonzalez, S.Kuzmaul, D.Deuel, R.Lucca, "PV array simulator development and validation," *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 002849 - 002852, 2010.
- [4] Brochure, Elgar TerraSAS: Programmable Solar Array Simulator, AMETEK Programmable Power Co.
- [5] J.Ahn, H.Choi, J.Lee, "Performance Evaluation Equipments for 250kW Photovoltaic Inverter," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 64-65, Nov. 2010.
- [6] S-J.Kim, B-D.Min, J-P.Lee, T-J. Kim, D-W.You, E-H.Song, "Photovoltaic simulator using a novel photovoltaic simulation method," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 129-131, Nov. 2009.
- [7] J-M.Jho, N-Y.Harm, D-G.Kim, S-J.Lee, S-N.Kim, H-G.Lee, K-H.Han, "A Study on the Inverter performance test by Simulated Converter," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 765-768, July. 2003.
- [8] H.Kim, S-K.Sul, "A Novel Filter Design for Output LC Filters of PWM Inverters," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 74-81, Jan. 2011.
- [9] E.Twining, D.G.Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, pp. 888-895, May 2003.
- [10] M.Liserre, F.Blaabjerg, S.Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 41, pp. 1281-1291, 2005.
- [11] T.C.Y.Wang, Ye.ZHihong, G.Sinha, X.Yuan, "Output Filter Design for a grid-interconnected three-phase inverter," *Power Electronics Specialist Conference, PESC '03*, Vol. 2, pp. 779-784, June 2003.
- [12] J-H.Park, M-H.Chi, H-G.Kim, T-W.Chun, E-C.Nho, "LCL Filter Design for Grid-connected PCS Using Total Harmonic Distortion and Ripple Attenuation Factor," *The transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 3, pp. 235-243, 2010.
- [13] F.M.P.Hidalgo, J.R.H.Larmbia, J.L.D.Pat, "Ripple reduction in DC line of a PWM drive by direct reinjection," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 4, pp. 971-973, 2000.
- [14] S-J.Kim, B-D.Min, J-P.Lee, T-J.Kim, D-W.You, Eui-Ho Song, "Photovoltaic simulator using a novel photovoltaic simulation method," *Autumn Conference Record of Korean Institute of Power Electronics*, pp. 129-131, Nov. 2009.



이성민(李誠民)

1983년 3월 26일생. 2011년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



유태식(兪太植)

1979년 6월 10일생. 2005년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2007년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2010년~현재 공주대 박사과정. 2007년~현재 씨엠파트너 선임연구원.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.