DBpia

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2022) 36(9) : 22～29
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2022.36.9.022 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 36-9-4

PV용 Interleaved Converter의 MPPT 및 전류 평형을 위한 DSP 기반의 제어기 설계 및 HILS 검증

(Design of DSP-based Controller for MPPT and Current Balancing of Interleaved Converter for Photovoltaic System and Verification Using HIL-Simulation)

정승재* · 안재범** · 임승범*** · 류홍제†
(Seung-Jae Jeong · Jae-Beom Ahn · Seung-Beom Lim · Hong-Je Ryoo)

Abstract

This paper proposes a digital controller designed for maximum power point tracking control and phase current balancing control for PV system. A variable-step incremental conductance method is applied for maximum power point tracking. For phase current balance of the interleaved boost converter, an average current balance control method that reduces the control instability due to phase difference of the phase currents and A/D conversion is proposed. The ADC frequency is set to 2 times the switching frequency and 10 times the MPPT frequency. The designed controller is implemented in the TMS320F28335 DSP, and through PLECS simulation, the superiority of the proposed controller compared to the open loop and the proposed average current balance control method compared to the general control method are verified. Finally, the performance of the proposed controller under dc and sine wave insolation conditions is verified through HIL-Simulation.

Key Words : Current balancing control, HILS, MPPT, Photovoltaic

1. 서 론

최근 에너지 고갈. 기후변화 대응 및 ESG 이슈 등으로 많은 전 세계 국가들이 신재생에너지 확대 정책을 펼치고 있으며, Photovoltaic(PV) 에너지가 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. PV 발전은 출력 효율이 낮으며 일사량에 따라 출력 전력이 쉽게 변하는 단점이 있다. 따라서 태양광 발전에서는 전압 및 전류가 조정되는 Power conditioning system(PCS)에서의 고효율 제어가 요구된다. PV PCS는 DC-DC 변환과 DC-AC 변환 두 개의 단계로 나뉘며[1], 첫 번째 변환단계인 DC-DC converter는 PV 모듈의 특성을 고려한 Maximum power point tracking(MPPT) 기법을 통해 전력 생산 효율을 높일 수 있다[2]. 보편적인 MPPT 방식 중 하나

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https//orcid.org/0000-0001-8657-7350
* Undergraduate student, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https//orcid.org/0000-0002-4140-3557
** M.S. and Ph.D. course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https//orcid.org/0000-0003-2881-8931
*** ESS Department Head, Eon Co., Ltd, Korea
https//orcid.org/0000-0002-7497-4970
Received : July 2, 2022
Revised : July 27, 2022
Accepted : August 26, 2022

Copyright ⓒ 2022 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.dbpia.co.kr

인 Incremental conductance(INC) 기법은 PV Array의 출력 컨덕턴스를 이용하여 컨덕턴스와 컨덕턴스 증분간의 대소 관계 비교를 통해 현 동작점이 위치를 판별하는 방식이다[3]. 최대전력점 추종을 위해 조정되는 전압 스텝 크기가 고정될 경우 추종속도와 정상상태에서의 안정성이 상호 대립되며 스텝 크기가 가변되는 제어 알고리즘을 통해 응답성과 안정성 모두 보완 가능하다[4].

한편 대용량 PV PCS용 DC-DC converter의 토폴로지로는 Interleaved converter가 주로 사용된다. 이는 입력 전류 및 전압에서 발생하는 리플이 작고, 각 상의 인덕터 소자에 흐르는 전류 레벨이 낮은 특성이 있어 낮은 정격의 소자를 사용할 수 있으며 부피 감소 및 스위치 방열을 효과적으로 할 수 있다는 장점이 있다[5]. 그러나 Interleaved converter를 사용할 경우 사용되는 각 소자 및 상간의 임피던스 차이 등으로 인해 상간 전류의 불평형 현상이 발생할 수 있다. 불평형 상태가 지속 될 경우 상대적으로 높은 전류가 인가되는 상에 발열 및 불평형 현상 심화 등의 문제점이 발생되고 이는 converter 성능 및 품질 저하로 이어진다[6]. 따라서 PV PCS를 위한 토폴로지로 Interleaved converter를 사용할 경우 상간 전류 불평형을 해소하면서 MPPT 제어가 가능한 제어기 설계가 요구된다.

전류 평형 제어를 구현하는 보편적인 방식으로 상 전류간 차이를 보상하는 방식이 있다. 그러나 기존의 방식은 상 전류 간 위상차로 인해 전류의 크기에 항상 차이가 존재하며, 디지털 제어기에서 A/D 변환 시에도 에러의 offset이 항상 존재한다. 따라서 상간의 전류 차이를 제어기의 입력 에러로 활용할 경우, 기존의 방식은 제어 불안정을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 3상 Interleaved converter의 3상 인덕터 전류의 평형을 효과적으로 제어하기 위한 평균 전류 평형 제어 기법이 제안된다. 평균 전류 평형 제어와 가변스탭 INC 기법 기반의 MPPT 제어가 적용된 PV PCS용 디지털 제어기가 제시된다. 제시된 제어기의 성능 검증을 위해 PLECS 기반의 시뮬레이션이 수행되었으며, 제안된 제어기는 TMS320F28335 DSP에 구현된 후 실시간 시뮬레이터 RT-BOX와 연동되어 HILS 검증이 수행된다.

본 논문의 2.1장에서는 3상 Interleaved boost converter (IBC) 및 PV Array의 특성과 PV-PCS용 토폴로지의 구성이 제시된다. 2.2장에서는 평균 전류 평형 제어 기법 및 가변스탭 INC 기법이 제시되고 제어기 모델링 및 설계에 대해 다룬다. 3장에서는 알고리즘의 타당성과 설계된 디지털 제어기의 성능 검증을 위해 PLECS를 이용하여 PV-3상 IBC 및 제안된 디지털 제어기를 모델링하고 시뮬레이션 결과가 제시된다. 4장에서는 제안된 제어기 모델이 320F28335 Digital signal processor(DSP)에 구현되며 실시간 시뮬레이터 RT-BOX를 이용하여 HIL-Simulation(HILS)을 통해 검증한다.

2. PV 3상 Interleaved converter용 제어기 설계

2.1. PV 모델링 및 3상 Interleaved converter

본 논문의 PV PCS는 Fig. 1과 같이 PV 패널 및 3상 IBC로 구성된다. 3상 IBC는 3개의 단상 boost converter가 병렬로 연결된 형태로 구성된다. 3상 IBC를 사용할 경우 스위치 및 인덕터에 흐르는 전류가 1/3배 감소하며, 따라서 boost converter에 비해 상대적으로 낮은 정격을 갖는 소자를 사용하는 것이 가능하다.

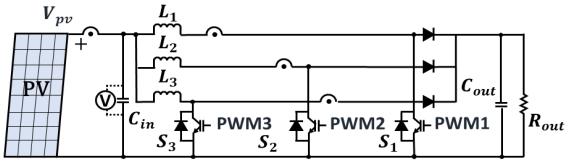


Fig. 1. PV-3 phase IBC for PV-PCS

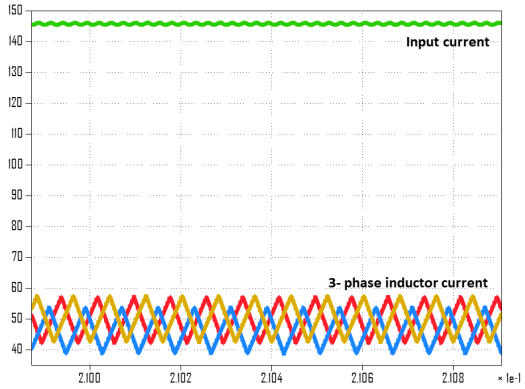


Fig. 2. Input current and phase current of 3-phase IBC

www.dbpia.co.kr

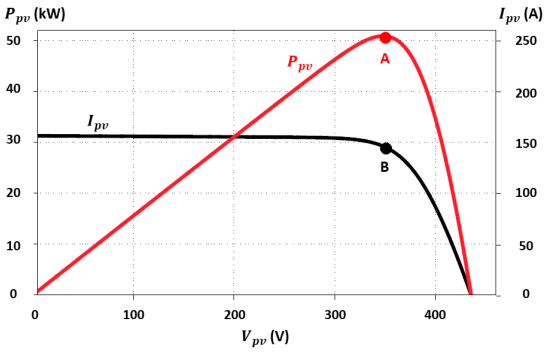


Fig. 3. PV Array characteristics for STC (output power versus voltage, output current versus voltage)

또한, 입력 전류 리플과 입력 전압 리플이 감소한다. 각 상의 전류는 120° 의 위상 차이가 발생하고, 따라서 입력단의 전류 리플이 1/3 배 적게 발생한다. Fig. 2는 이러한 3상 IBC의 전류 특성을 보여주며 따라서 3상 IBC가 PV PCS용 DC-DC converter의 토폴로지로 활용되었다.

PV Array는 1Soltech 1STH-215-P 모델의 출력 특성을 기반으로 모델링 되었으며 Fig. 3은 1000 W/m^2 의 일사량 조건, 기온 25° , 일사량 입사각 45° 의 태양광 패널 표준 테스트 조건을 의미하는 Standard Test Condition에서의 특성 곡선을 나타낸다. Fig. 3은 출력 전력-전압 특성과 출력 전류-전압 특성을 나타낸다. Fig. 3의 지점 A, B는 모두 전압 348 V, 전류 147A 일 때 출력 전력 51.16kW인 Maximum power point (MPP)를 나타낸다.

2.2. MPPT 및 평균전류평형 제어기 설계

Fig. 4는 PV-3상 IBC의 최대전력추종 및 전류평형 제어를 위한 블록도를 나타낸다. 제어기는 PV Array로부터 PV 출력 전압 V_{PV}, 출력 전류 I_{PV}, 3상 인덕터 전류 I_{L1},I_{L2},I_{L3}를 센싱한다. 각각의 센싱된 값은 제어기의 Analog to digital Converter(ADC)에 의해 이산신호 V'_{PV},I'_{PV},I'_{L1},I'_{L2},I'_{L3}으로 변환된다. 제어기 내부는 MPPT 제어 루프와 평균 전류 평형 제어 루프로 구분되며, V'_{PV},I'_{PV}는 MPPT 제어, I'_{L1}, I'_{L2},I'_{L3}는 전류 평형제어의 입력으로 활용된다.

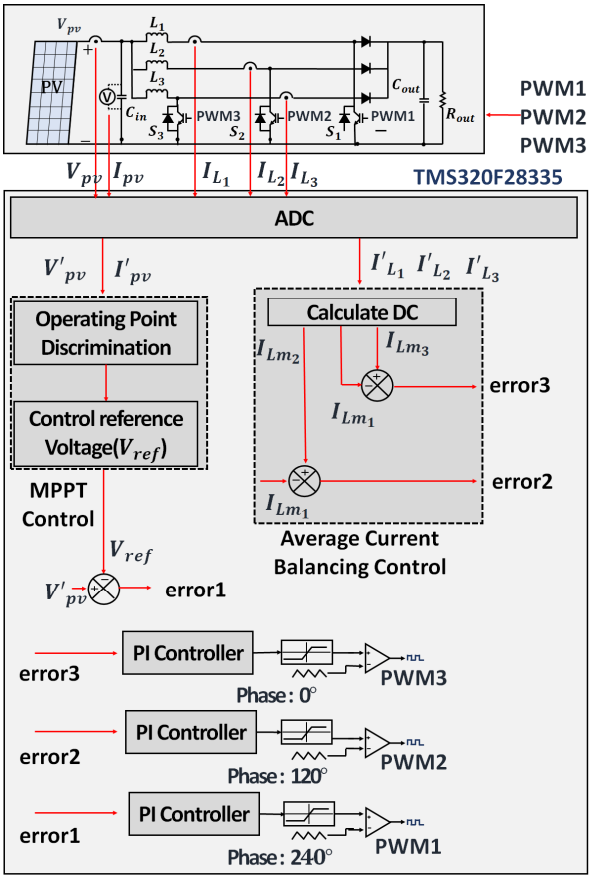


Fig. 4. Control system block diagram

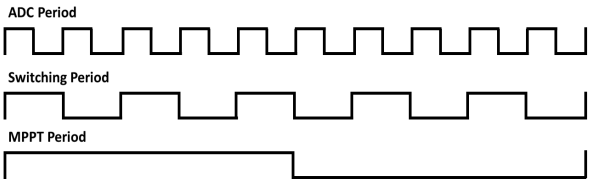


Fig. 5. ADC, Switching, MPPT Period

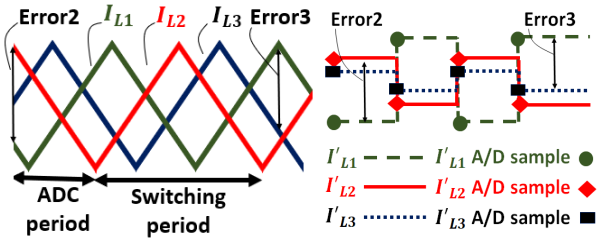
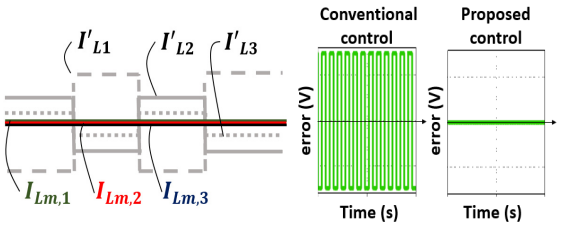


Fig. 6. Error results from phase difference and A/D conversion of I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} (a) phase difference (b) A/D conversion

www.dbpia.co.kr



(a) (b)

Fig. 7. Comparison of conventional control and proposed control (a) average of I'_{L1}, I'^{L2}, I'_{L3} (b) error

Fig. 5는 ADC, 스위칭, MPPT의 주기를 클럭으로 나타낸 블록도이다. DSP의 동작 성능과 ADC를 통한 이산화된 신호의 resolution 및 제어 정확도를 고려하여 ADC 주파수는 스위칭 주파수의 2배로 설정되었다. MPPT 동작 주파수에 따른 최대전력점 추종 속도 및 PV 출력 효율 간의 trade off가 존재하며 MPPT 동작 주파수는 ADC 주파수의 1/10로 선정되었다.

3상 전류 평형 제어를 위해 본 논문에서 제안된 평균 전류 평형 제어 기법이 적용되었다. 상 전류간의 차이를 error로 연산하는 일반적인 제어 방식과 비교하였을 때, 제안된 제어 기법은 상 전류간 위상차와 A/D변환으로 인한 이산신호의 왜곡이라는 2가지 현상에 의해 발생하는 error에 의한 영향을 적게 받는 장점이 있다. Fig. 6에는 일반적인 제어방식에서 2가지 현상에 의해 발생하는 error가 도식화되었다. Fig. 6(a)와 같이 상 전류 I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} 간의 위상차로 인해 error가 지속적으로 발생한다. 상 전류는 Fig. 6(b)와 같이 스위칭 주기당 2번 A/D 샘플링이 이루어지며 sample and holding을 통해 구형파 형태의 이산신호 $I'_{L1}, I'_{L2}, I'_{L3}$ 로 변환된다. 마찬가지로 이산신호 $I'_{L1}, I'_{L2}, I'_{L3}$ 간에도 error가 지속적으로 발생한다. 이렇게 2가지 현상에 의해 발생하는 error는 converter 성능 감소 및 전체 시스템 효율 감소로 이어진다. 평균 전류 평형 제어 기법에서는 Fig. 7(a)와 같이 이산신호 $I'_{L1}, I'_{L2}, I'_{L3}$ 의 평균값 $I_{Lm1}, I_{Lm2}, I_{Lm3}$을 스위칭 주기마다 연산한다. 평균값 $I_{Lm1}, I_{Lm2}, I_{Lm3}$은 앞서 제시된 2가지 현상에도 불구하고 평형상태에서 이론적으로 동일한 값을 가지며, 따라서 Fig. 7 (b)와 같이 일반적인 제어방식에서 발생하던 진동하는 error가 제안된 제어기법에서는 제거된다.

이산신호의 평균값 I_{Lms}는 식 (1)과 같이 연산된다. s는 1,2,3의 값으로 상(phase)을 의미하며, n은 스위칭 주기당 ADC 샘플링 횟수, $I_{Ls}(k)$는 k번째 ADC된 값을 의미한다. I_{Lm1}을 기준으로 나머지 평균값 I_{Lm2}, I_{Lm3}와의 차이가 식 (2)와 같이 각각 에러 e_2, e_3로 연산된다.

$$I_{Lms} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} I_{Ls}(k) = \frac{1}{2}(I_{Ls}(k) + I_{Ls}(k-1)) \quad (1)$$

$$e2 = I_{Lm,2} - I_{Lm,1},\ e3 = I_{Lm,3} - I_{Lm,1} \quad (2)$$

에러 e_2, e_3는 각각 PI 제어기를 통해 보상되며 PWM 생성기에서 Carrier 신호와의 비교를 통해 PWM2, PWM3 신호가 생성된다. 생성된 PWM 신호는 각각 IBC의 스위치 S2, S3의 게이트로 입력된다.

MPPT 제어 루프에서는 센싱된 PV 패널의 출력 전압, 전류가 A/D 변환되며 변환 값 V'_{PV}, I'_{PV} 값을 활용하여 가변스탭 Incremental Conductance 알고리즘을 통해 현 동작점이 판단된다.

출력된 레퍼런스 전압은 V'_{PV}와 비교되어 에러 e_1으로 출력되며, e_1은 마찬가지로 PI 보상기를 거친 후 PWM 생성기에서 Carrier 신호와의 비교를 통해 PWM1 신호가 출력된다. PWM1 신호는 IBC의 스위치 S1의 게이트 단자에 입력된다. 설계된 제어기는 DSP TMS320F28335에 구현된다.

3 시뮬레이션 결과

PV PCS 시스템은 PLECS를 통해 모델링되었으며, 오픈루프 제어로 일사량이 일정한 시간 간격으로 $1000\,W/m^2$와 $500\ W/m^2$로 변경되는 조건에서 동작 시뮬레이션한 결과 파형이 Fig. 8(a)이다. 오픈루프 동작시 IBC 회로의 스위치 게이트 단자에 120° 의 위상차를 갖는 duty 0.5의 PWM 신호가 인가된다. 제안된 제어기 또한 PLECS에 모델링되었으며 오픈루프와 동일한 일사량 조건에서 제어기에 의해 제어된 PV

www.dbpia.co.kr

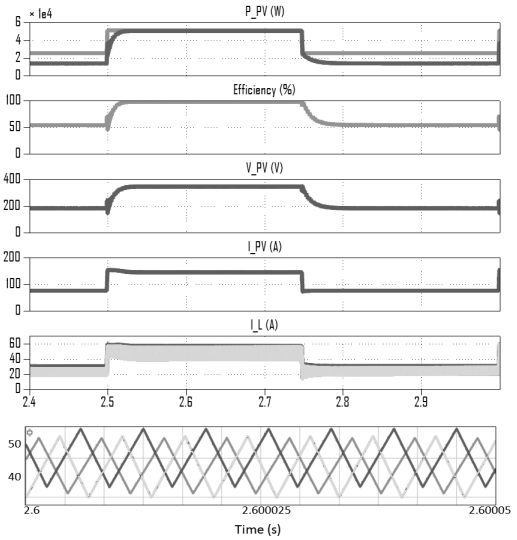
PCS 시스템의 시뮬레이션 결과 파형이 Fig. 8(b)에 나타난다. Fig. 8(a), (b) 모두 실제 소자 및 상간 임피던스의 불균형을 반영하기 위해, 각 상 인더턴스가 5%의 차이를 갖도록 설정되었다. Fig. 8의 상단에서부터 차례로 PV 출력 전력, 효율, 출력 전압, 출력 전류, 각 상의 인덕터 전류 파형과 인덕터 전류 확대 파형을 보여주며 결과값은 Table 1과 같다. 오픈루프의 경우 일사량 $1000\,W/m^2$에 최적화된 파라미터로 설정되었으므로 $1000\,W/m^2$ 조건에서 높은 효율로 동작하였으나, 일사량이 $500\,W/m^2$로 변하면 출력 효율이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

반면 제안된 제어기의 경우 오픈루프 방식에 비해 MPP 효율이 높게 측정되었다. 또한 Fig. 8(a)의 인덕터 전류의 확대 파형에서 상간 인덕턴스 불균형으로 인해 상 전류 간 불평형이 발생한다. 그러나 Fig. 8(b)에서는 인덕턴스 불균형에 의한 상 전류간 불평형 현상이 제안된 전류 제어기에 의해 해소된 결과를 보여준다.

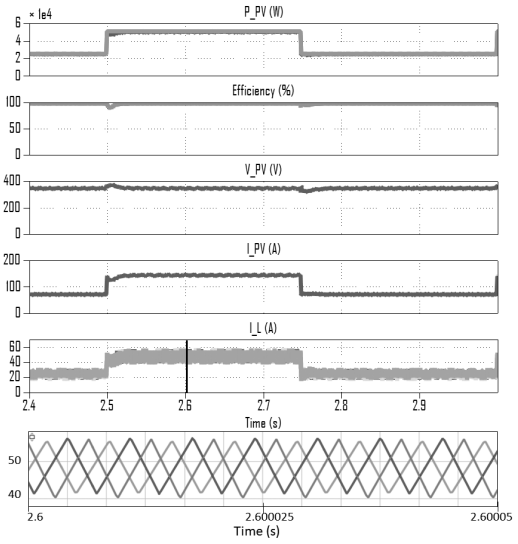
Table 1. Results of openloop and Proposed control

오픈루프 & 제안된 제어기 결과값 비교				
	오픈루프		제안된 제어기	
일사량 (W/m^2)	1000	500	1000	500
출력전력 (kW)	50.68	14.12	50.68	25.37
효율 (%)	98.45	54.87	98.44	98.57
출력전압 (V)	347.54	183.55	349.42	35.44
출력전류 (A)	145.83	76.95	145.02	72.40
I_{L1} (A)	51.28	26.10	48.35	24.31
I_{L2} (A)	48.09	28.81	48.72	23.20
I_{L3} (A)	46.46	22.03	47.95	24.89

Fig. 9는 일사량 $1000\,W/m^2$ 조건에서 각각 상 전류간 차이를 보상하는 일반적인 전류평형 제어방식과 제안된 평균 전류평형 제어방식에 의해 수행된 시뮬레이션 파형을 나타내며 결과값은 Table 1과 같다. 일반적인 전류평형 제어방식은 상간 위상차로 인해 상간 약 $\pm 2.8\,V$, $\pm 7.5\,V$에서 진동하는 에러가 발생하는 반면, 평균 전류평형 제어방식은 각 상의 전류의 평균화 개념이 적용되어 제어기의 에러가 0에 근사한 값을 갖는다. 이로 인해 일반적인 전류평형 제어방식에서 진동이 크게 발생하고 정상상태에서의 효율이 감소한



(a)



(b)

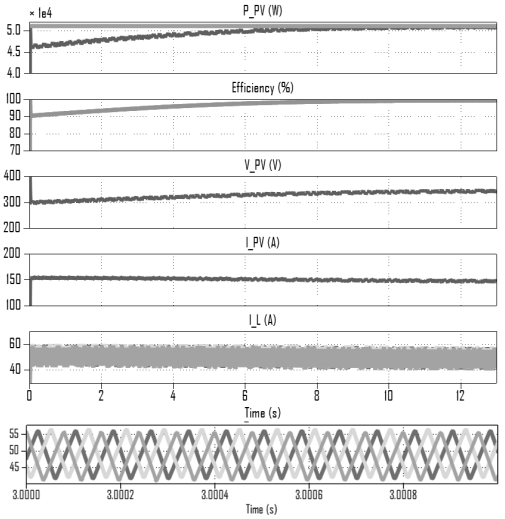
Fig. 8. Simulation results of PV-IBC (a) OpenLoop (b) Proposed controller

다. 두 제어방식의 정상상태 효율이 동일한 상태에서 MPP 도달시간을 비교하기 위해 제어기 게인값들이 선정되었다. 정상상태에서의 효율이 일반제어방식 99.51%, 평균 전류평형 제어방식 99.58%로 게인값들이 선정되었을 때 두 제어방식의 MPP 도달 시간은 각각 약 12.5초, 1초로 제안된 제어방식에서 상대적으로 빠르게 MPP에 도달하는 것이 측정되었으며, 이를 통해 제안된 제어기의 우수성이 검증되었다.

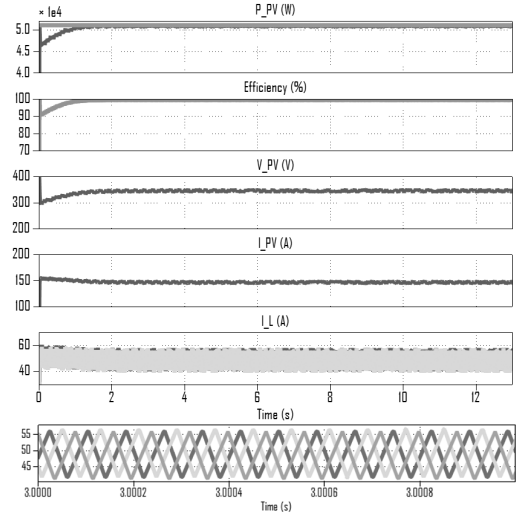
www.dbpia.co.kr

Table 2. Results of common current balancing and average current balancing control

일반 전류제어 & 평균 전류평형제어 비교		
	일반전류제어	평균전류제어
출력전력 (kW)	50.86	50.93
효율 (%)	99.511	99.58
출력전압 (V)	344.50	346.65
출력전류 (A)	147.73	146.65
I_{L1} (A)	49.27	48.98
I_{L2} (A)	49.69	48.40
I_{L3} (A)	48.77	48.53



(a)



(b)

Fig. 9. Simulation results for irradiation of 1000 W/m^2 (a) Common current balancing control (b) Average current balancing control

4. HIL-Simulation 결과

시뮬레이션으로 검증한 제어기 모델은 TMS3-20F28335 DSP에 구현되었으며. HIL-Simulation 검증을 위해 Fig. 10과 같이 실험 환경이 구축되었다. PV PCS의 PLANT 모델은 실시간 시뮬레이터 RT-BOX를 통해 동작되며, 제어기는 DSP를 통해 동작되고, 두 장치는 실시간으로 연동된다. DSP는 RT-BOX로부터 PV 출력 전압, 전류, 3상 전류를 센싱하고 연산된 PWM 신호를 RT-BOX로 출력한다. PC에서는 RT-BOX의 출력이 실시간으로 확인 가능하다.

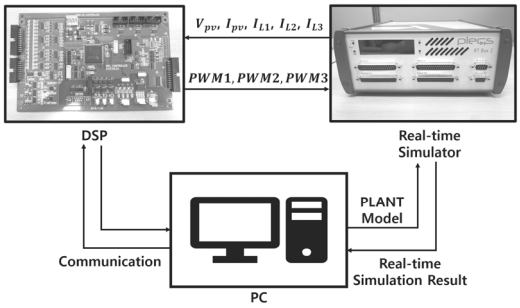
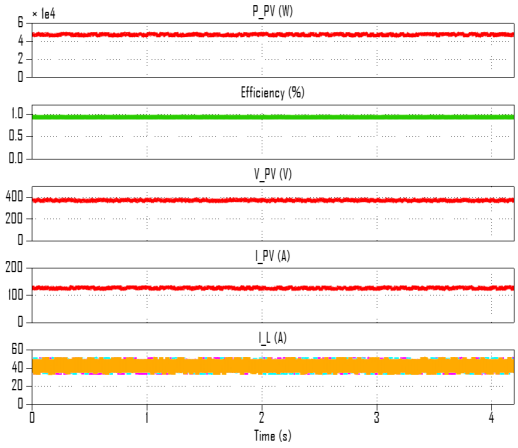


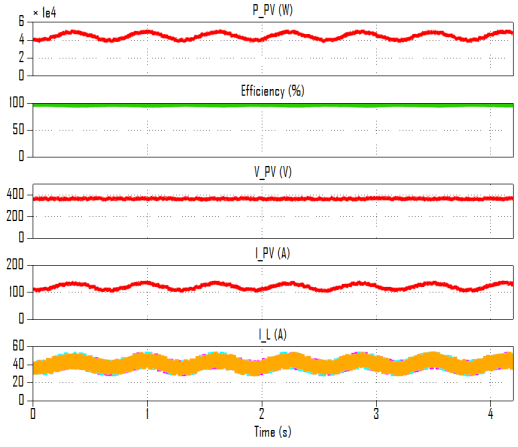
Fig. 10. Configuration of HILS system

Fig. 11은 제안된 제어기를 이용하여 PV-PCS 시스템을 제어하는 것을 HIL-Simulation을 통해 검증한결과 파형이다. Fig. 11(a)는 1000 W/m^2의 일사량 조건, Fig. 11(b)는 1000 W/m^2와 800 W/m^2 사이에서 진동하는 정현파 형태의 일사량 조건이며, 제안된 제어기는 두 가지 조건 모두에서 안정적으로 MPPT 및 전류평형 제어가 수행되는 것이 확인되었다. Fig. 11(a)에서는 전압 373.77 V, 전류 127.40 A에서 동작하며, 출력 47.62 kW로 93.10% 의 효율을 달성하였다.
또한 3상 인덕터 전류의 평균값은 각각 42.41 A, 42.40 A, 42.59 A이며, 3상 인덕터 전류 평균의 산포도는 상대표준편차 (RSD) 0.25% 로 높은 상간 전류평형을 달성하였다. Fig. 11(b)에서는 전압 366.34 V, 전류 121.80 A에서 동작하며 평균 출력 44.62 kW로 효율 97.16% 를 달성하였다. 또한, 3상 인덕터 전류의 평균값은 40.58 A, 40.50 A, 40.72 A이며, 상대 표준편차 RSD는 0.28% 로 전류 평형 성능을 검증하였다.

www.dbpia.co.kr



(a)



(b)

Fig. 11. HIL-Simulation results (a) DC irradiation (b) Sine wave irradiation

5. 결 론

본 논문에서는 PV-3상 IBC용 MPPT 및 3상 전류 평형 제어를 위한 디지털 제어기가 제안되었다. 3상 전류 평형 제어는 3상 전류의 위상차로 인해 발생하는 에러와 디지털 제어기에서 A/D 변환 시 발생하는 에러를 해결하고자 하였으며, 이를 위해 스위칭 주기마다 계산된 상 전류의 평균값 간의 차이를 보상하는 평균 전류평형 제어기법이 제안되었다. PV 출력 효율을 높이기 위해 가변스탭 INC 알고리즘을 통해 MPPT 제어가 수행되었다. 또한 일반 전류제어 방식과 비교하여, 제안된 평균 전류평형 제어방식을 통해 제어기의 고정적인 에러를 제거하였으며, MPP 도달시간을 단축하는 성능이 검증되었다. 또한 1000 W/m^2의 일사 조건과 정형파 형태의 일사 조건에서 HIL-Simulation을 수행하였으며, 각각 PV 출력 효율 93.10% 와 97.16 %, 상간 전류의 상대 표준편차 RSD 0.25% 와 0.28% 로 PV-3상 Interleaved converter를 제어하는 성능을 검증하였다.

Acknowledgement

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF), Korea government (MSIT) (No. NRF2020R1A2C2099663) and in part by the Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, under the "Regional Innovation Cluster Development Program (R&D, P0016220)" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT).

References

[1] Doo-Yong Jung, et al., "Interleaved Soft-Switching Boost Converter for Photovoltaic Power-Generation System," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 26, No. 4, pp. 1137-1145, 2011.

[2] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.

[3] Bongsuck Kim, et al., "A Study on High-Efficiency MPPT Algorithm Based on P&O Method with Variable Step Size," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8, 2019.

[4] Jichan Kim and Hanju Cha, "A Novel Voltage Conrol MPPT Algorithm Using Variable Step Size based on P&O Method," The Korean Institute of Power Electronics, Vol. 25, No. 1, pp. 29-36, 2020.

[5] Gautham Ram Chandra Mouli, Jos H. Schijffelen, Pavol Bauer, and Miroslav Zeman, "Design and Comparison of a 10kW Interleaved Boost Converter for PV Application Using Si and SiC Devices," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics Power Electronics, Vol. 5, No. 2, pp. 610-623, 2017.

[6] Shamim Choudhury, "DSP based Digitally Controlled Interleaved PFC Converter," 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 648-654, 2005.

www.dbpia.co.kr

Biography



Seung-Jae Jeong

He is pursuing the B.S. degree at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. South Korea, in 2016. His research interests include power electronics and PV inverter control.



Jae-Beom Ahn

He received the B.S. degree in electronic engineering from Kook-min University, Seoul, South Korea, in 2019. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include power electronics, high-voltage pulse power systems and arc fault detection in DC PV systems.



Seung-Beom Lim

He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Dankook University, Yongin, Korea, in 2004, 2006, and 2014, respectively. Since 2007, he has been a General Manager of ESS R&D department on EON Co., Ltd., Anyang, Korea. His current research interests include multi-level converters/inverters, high-power density converter/inverter design, and modular UPSs.



Hong-Je Ryoo

He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is the cooperation vice president of the Korean Institute of Power Electronics, the editorial vice president of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers. and the chairperson of the High Voltage and Pulsed Power Application Research Council, Korean Institute of Power Electronics.

www.dbpia.co.kr