

독립형 태양광 전력변환장치 연구

양승대*, 정승환**, 최주엽+, 최익**, 이상철***, 이동하***

*광운대학교 임베디드SW학과 (ysd0927@kw.ac.kr), +교신저자 : 광운대학교 전기공학과 (juyeop@kw.ac.kr)
광운대학교 로봇학과, *대구경북과학기술원

The Study of Stand-alone Photovoltaic Power Conditioning System

Yang, Seung-Dae*, Jung, Seung-Hwan**, Choi, Ju-Yeop+, Choy, Ick**, Lee, Sang-Chul***,
Lee, Dong-Ha***

*Dept. of Embedded SW, Kwangwoon University (ysd0927@kw.ac.kr)
+Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University
**Dept. of Information and Control Engineering, Kwangwoon University
***Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

Abstract

This paper is about the study of a stand-alone photovoltaic power conditioning system with an energy storage system with battery. The paper proposes the appropriate circuit model of stand-alone PV PCS considering the maintenance of the battery system. It also proposes the buck converter modeling by a state-space averaging method considering characteristics of solar cell. Lastly, it shows the way to choose the suitable battery and to design the model of bi-directional converter for charging and discharging battery. PSIM simulation is used to validate the proposed algorithm of the system.

Keywords : 독립형 태양광 전력변환장치(Stand-alone PV PCS), 상태평균화 기법(State-space averaging method), 양방향 컨버터(Bi-directional converter)

1. 서 론

최근 세계적으로 지구환경문제로 인한 기후변화와 화석 에너지의 고갈 및 가격급등에 따라 풍력, 연료전지 및 태양광 발전 등의 신재생 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다.

독립형 태양광 발전 시스템은 상용전원을 공급받지 못하는 도서지역이나 산간지역 등에서 에너지 저장장치와 복합적으로 운전하여 부하에 전력을 공급하는 용도로 운용되고 있다. 배터리와 같은 에너지 저장장치의 충·방전 시스템, DC링크 전압과 DA/AC 인버터

의 효율적 구성이 필요하다.

본 논문에서는 독립형 태양광 발전 시스템의 안정된 동작을 위한 회로구성을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 검증하여 본다.

2. 독립형 PV PCS 시스템 구성

배터리를 에너지 저장장치로 사용하는 독립형 PV PCS 시스템의 기본 구성은 그림(1)과 같다. 배터리 제조사에서 일반적으로 12V의 배터리 셀을 제공하며 전압 불 평형으로 인한 문제점을 고려하여 4직렬연결까지 보장, 사용권장을 하고 있다. 따라서 배터리의 전압용량은 48V로 선정하였다. 부스트 컨버터의 안정적 승압 비 3.75배로 하여 180V의 DC링크 전압을 잡았다.

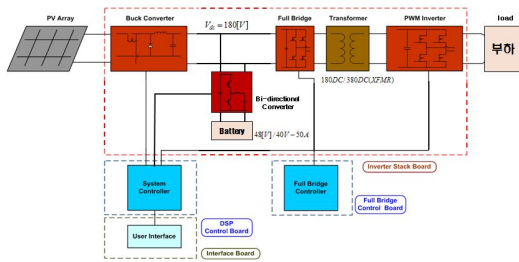


그림 1. 독립형 PV PCS 시스템

일반적인 3kW급 태양광 발전 시스템의 셀 입력 전압의 최소값은 170V, 180V 정도이다. 따라서 전압을 감압하는 벡 컨버터를 DC링크 앞단에 사용하게 된다. 180V의 DC링크 전압으로는 AC 220V의 상용 부하 전압을 만들 수 없으므로 변압기를 이용, 380V로 승압한다. 변압기 크기와 손실을 고려하여 그림1과 같이 Full-Bridge 정류회로, 고주파변압기를 거쳐 PWM 인버터를 사용하여 상용 AC 220V 전압을 부하에 제공하게 된다.

3. 벡 컨버터의 모델링

3.1 벡 컨버터 회로구성

태양광 전지를 입력으로 하는 벡 컨버터를

모델링하기 위하여 앞에서 모델링 한 태양광 전지 회로와 기본 벡 컨버터의 회로를 결합하였다. 벡 컨버터의 출력 단 캐패시터는 V_{DC} 가 일정하게 공급되고 있다고 가정하여 삭제하면, 그림(2)의 회로를 구성할 수 있다.

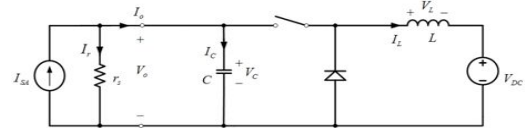


그림 2. 태양전지를 고려한 벡 컨버터의 회로

3.2 상태평균화 방법

벡 컨버터의 모델이 스위치 On/Off 상태로 각각 구분되기 때문에, 하나의 선형화 된 수식으로 나타내기 위하여 상태평균화 방법을 적용한다.[1] 그 결과를 블록 다이어그램으로 표현하게 되면 그림(3)와 같다. 해당되는 전달함수는 수식(1)~(6)과 같이 표현된다.

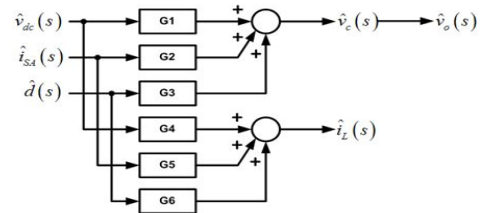


그림 3. 벡 컨버터의 입출력 블록다이어그램

$$G_1(s) = \frac{r_s D}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{r_s L s}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (2)$$

$$G_3(s) = -\frac{r_s (L I_L s + D V_c)}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (3)$$

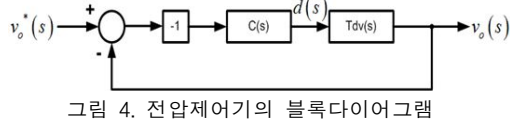
$$G_4(s) = -\frac{r_s C s + 1}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (4)$$

$$G_5(s) = \frac{r_s D}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (5)$$

$$G_6(s) = \frac{r_s C V_c s + (V_c - r_s D I_L)}{r_s L C s^2 + L s + r_s D^2} \quad (6)$$

4. 벡 컨버터의 제어기술

4.1 전압제어기 설계



전압제어기의 구성은 그림(4)와 같다. $v_o(s)$ 와 $d(s)$ 의 관계가 반비례한 특성을 가지기 때문에 -1 블록을 추가하였으며, $C(s)$ 는 선형제어기 블록이다. 제어기 $C(s)$ 를 설계하기 위한 조건은 아래와 같다.

- 정상상태 오차를 줄이기 위하여 DC이득이 커야 한다. 즉 원점에 극점이 존재해야 한다.
- 안정한 위상여유를 얻기 위하여 0[db]를 통과하는 이득의 기울기를 $-20[\text{db}/\text{dec}]$ 로 한다. 0[db]의 이득에서 위상이 -90° 에 근접해야 한다.
- 이득이 0[db]를 통과하는 주파수를 교차주파수라고 할 때, 샘플링 이론을 근거로 하여 교차주파수를 스위칭 주파수의 $1/4 \sim 1/5$ 이하로 한다.
- 좋은 과도 특성을 얻기 위하여 위상여유를 $45^\circ \sim 60^\circ$ 로 한다.

제어기를 설계하기 위해서 다음 표(1)의 시스템 파라미터를 사용한다. f_{sw} 는 2kHz로 선정하였다.

표 1. 시스템 파라미터

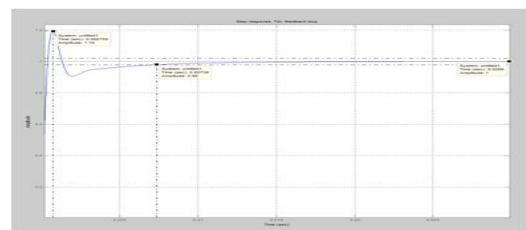
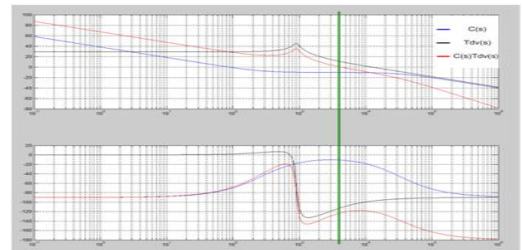
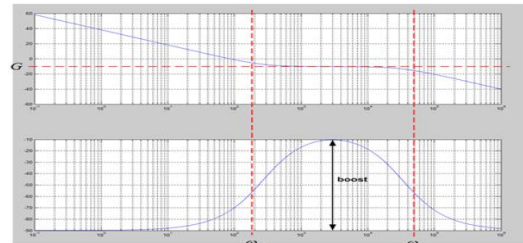
기호	값	기호	값
I_{SA}	7.2 (A)	C	1500 (uF)
r_s	4.278 (Ω)	L	240 (uH)
$\omega_{f_{sw}}$	20,000 (Hz)	V_{DC}	8.4 (V)

4.2 2pole-1zero 제어기 설계

2pole-1zero 제어기는 다음 수식(7)과 같은 형태의 전달함수를 가진다. 정상상태 오차를 0으로 하기 위한 영점을 극점으로 가지며, 1 pole과 1 zero의 값을 적절하게 배치하여 원하는 교차주파수와 위상여유를 가질 수 있게 한다.

$$C(s) = G \frac{(s + \omega_z)}{s(s + \omega_p)}, \quad G \text{ is positive, } \omega_z < \omega_p \quad (7)$$

그림(5)은 수식(7)의 보데선도이다. 위상 boost는 원하는 주파수에서 위상의 높낮이를 조정하여 위상여유를 맞출 수 있음을 뜻한다. 위상 그래프에서 3KHz에서 80° 의 위상을 점프시켰다. 그림(6)는 설계한 2pole-1zero 제어기와 시스템의 보데선도이다. 4KHz에서 교차주파수를 가지게 하였으며, 이 때 위상여유는 55° 가 된다.



그림(7)은 2pole-1zero 제어기의 시스템 페루프 전달함수의 스텝응답이다. 특성을 분석해보면, 오버슈트는 19%, 정상상태 도달시간은 7.4ms, 정상상태 오차는 0이 된다. 응답과형은 PI 제어기와 비슷하지만 2pole-1zero

제어기는 모든 제한 조건을 만족시킨다.

4.3 전류리미터

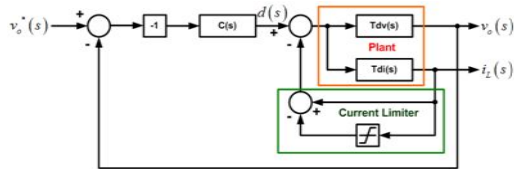


그림 8. 전류 Limiter를 포함한 시스템 제어 블록도

과도상태에서 허용 전류용량을 넘어서게 될 수 있다는 문제를 안게 된다. 그림 (8)과 같이 전류에 대한 리미터를 두는 방법이 있다. 벡 컨버터의 출력전류 i_L 이 리미터에 걸리게 되면, 듀티가 줄어들게 작용함으로써 v_o 는 증가하게 되고, i_L 은 감소하게 된다.

4.4 전압제어기 시뮬레이션

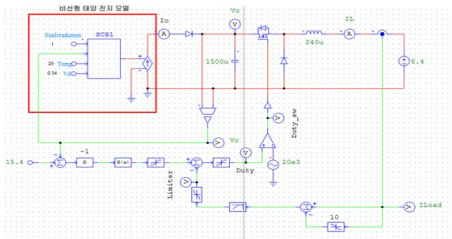


그림 9. 비선형 태양전지 모델을 사용한 PSIM Schematic

그림(9)는 전류리미터와 실제 태양전지와 유사하게 모델링된 비선형 태양전지 모델을 넣은 회로이다. 시뮬레이션 결과파형은 그림 (10), (11)과 같다. v_o 가 정상상태 도달시간이 오래 걸리지만, 리미터의 영향으로 인하여 전류가 10A 이상이 되었을 때 전류가 줄어들음을 확인할 수 있다.

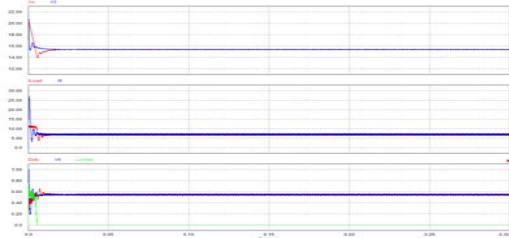


그림 10. PSIM 시뮬레이션 결과 파형



그림 11. 그림 22 과도 상태의 확대 파형

4.5 벡 컨버터와 풀 브릿지 회로 모의실험

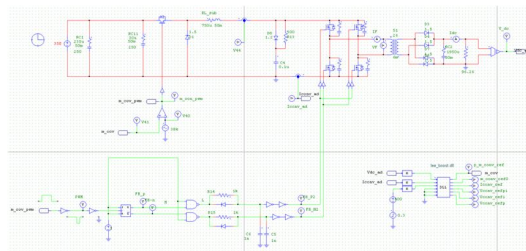


그림 12. 벡 컨버터와 풀 브릿지 회로 PSIM Schematic

표 2. 벡 컨버터와 풀 브릿지 모의실험 파라미터

항 목	파라미터값	항 목	파라미터값
입력 전압	200~550[V], MPP : 350[V]	벡 컨버터 인덕터	750[μH], ESR : 0.05[Ω]
출력 전압	380[V]	커패시터	In : 250[μF], ESR : 0.05[Ω] Out : 500[μF], ESR : 0.05[Ω]
부하 저항	1,500[W], 98.28[Ω]	스위칭주파수	38[kHz]
출력 전류	7.89[A]		

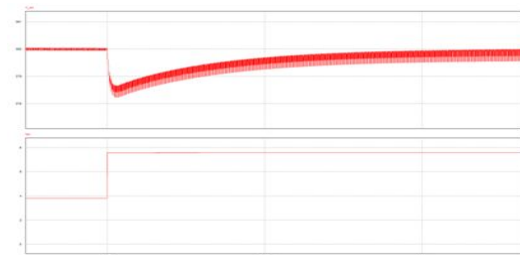


그림 13. 부하변동실험 결과 파형

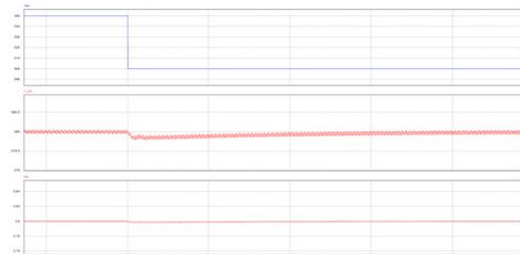


그림 14. 태양전지전압 변동 실험 결과 파형

제어기의 신뢰성을 판단하기 위해 태양전지의 전압 변동 및 부하저항 변동에 따른 전압 응답을 확인하였다. 그림(13)은 부하저항이 96Ω에 192Ω으로 50%변동될 때의 출력 전압 및 전류의 파형을 나타냈으며, 그림(14)는 태양전지 전압이 350V에서 300V로 변동될 때의 출력 전압 및 전류의 응답 파형이다.

5. 양방향 컨버터 모델링

5.1 Bi-Directional Converter 회로

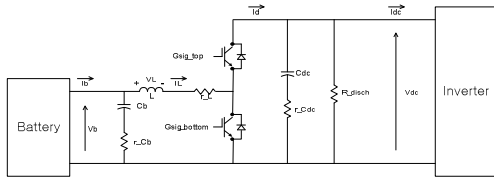


그림 15. Bi-Directional Converter 회로

Bi-directional Converter의 모델링을 위한 대략적인 회로도이다. Bi-directional Converter에는 총 3개의 수동소자와 2개의 IGBT로 구성된다. 부스트 컨버터 모드에서는 아래쪽의 IGBT가 스위치, 위쪽의 IGBT의 환류 다이오드가 동작을 하게 되며 벽 컨버터 모드에서는 두 개의 역할이 바뀌게 된다.

5.2 Bi-Directional Converter 모의실험

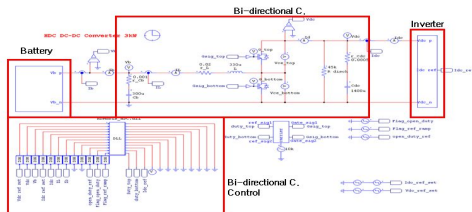


그림 16. Bi-Directional Converter 회로 PSIM Schematic

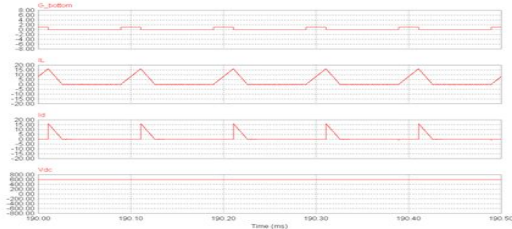


그림 17. Boost Mode 결과 파형

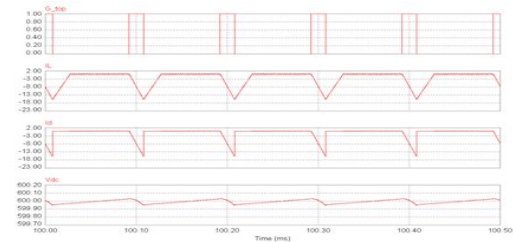


그림 18. Buck Mode 결과 파형

시뮬레이션은 그림(16)과 같이 구성이 되어 있다. 결과는 그림(17), (18)과 같이 IGBT_bottom이 도통일 때 인덕터 전류 i_L 은 0에서부터 증가하고 L에는 에너지가 축적된다. 스위치가 차단되면 L에 축적된 에너지는 환류 다이오드를 통하여 출력 측으로 방출된다. 이 때 i_L 은 0으로 감소해간다. (불연속 모드) 스위치가 차단된 상태에서 i_L 이 0이 되면 환류 다이오드까지 차단되어 이 기간 동안에 출력 커패시터 Cdc로부터는 전하가 출력으로 방전된다. IGBT_top이 도통일 때는 그와 반대로 동작함을 볼 수 있다.

6. 배터리 모델링

6.1 배터리 모델링 회로

배터리는 배터리 전류의 방향에 따라 배터리의 충전과 방전이 결정되게 된다. 아래 그림에서 $I_b > 0$ 일 때는 방전, $I_b < 0$ 일 때는 충전을 나타낸다. R_1 의 경우에는 정상상태 특성을 나타낸다. C_1 과 R_2 가 배터리의 과도상태 특성을 나타낸다. 내부저항이 최소일 때는 R_1 , 최대일 때는 $R_1 + R_2$ 의 값을 가진다. 모델링을 진행하기 이전에 배터리의 특성을 이해하고 몇 가지 가정을 할 필요가 있다.

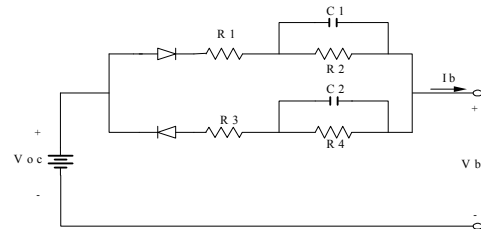


그림 19. 배터리 등가 모델링

- SOC(State of Charge)가 75%일로 설정한다.
- 내부 파라미터는 충전 시와 방전 시에 각각 다른 값을 가진다.
- SOC와 배터리 개방회로 전압은 수식(8), (9)와 같다.
- 배터리 개방전압 OCV(Open Circuit Voltage)는 SOC에 따라 변화하는 변수로 수식(10)과 같다.

$$SOC = \frac{(Ahr_init \times 3600 - \int I_{bat_out} dt)}{Ahr_rate \times 3600} \quad (8)$$

$$V_b = V_{OC} - I_b(R_1 + R_2) - \frac{1}{CR_1} \int I_b e^{-\frac{t}{CR_1}} dt - \frac{1}{CR_2} \int I_b e^{-\frac{t}{CR_2}} dt \quad (9)$$

$$V_{OC} = 0.0167 \times SOC + 11.866 \quad (10)$$

6.2 배터리 모델링 시뮬레이션

표(3)의 파라미터로 배터리 4개를 직렬로 연결한 값으로 그림(20)과 같이 시뮬레이션을 구성하였다.

표 3. 배터리 모델링 모의실험 파라미터

Parameter	R1[Ω]	R2[Ω]	C1[F]	R3[Ω]	R4[Ω]	C2[F]
평균값	0.0104	0.0207	756.5	0.005	0.0027	23798.4

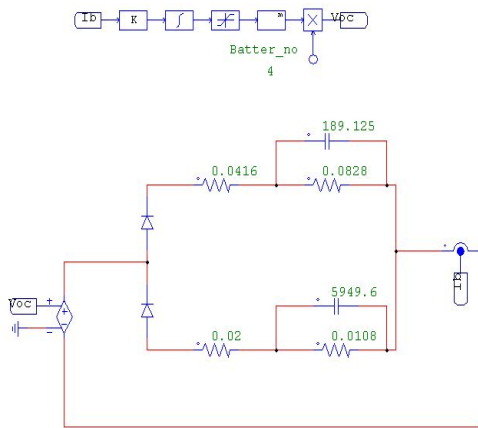


그림 20. 배터리 모델링 PSIM Schematic

결과는 그림(21), (22)와 같이 충전방전이 이루어짐을 볼 수 있다.

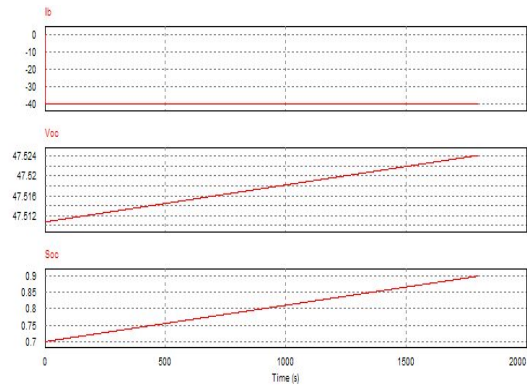


그림 21. 배터리 충전 모의실험 결과 파형

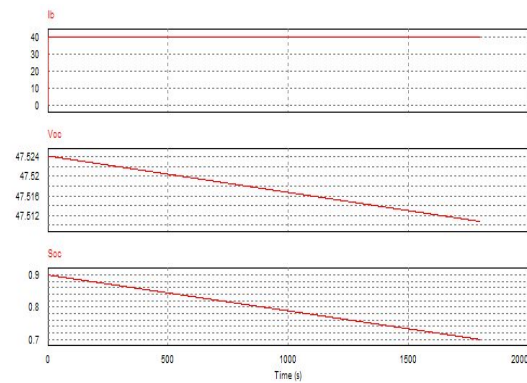


그림 22. 배터리 방전 모의실험 결과 파형

7. 결론

본 논문에서는 배터리를 사용하는 소용량의 독립형 태양광 발전 시스템의 적절한 회로 제시하고 실제 백 컨버터, 풀 브릿지, 양방향 컨버터, 배터리의 모델링을 통하여 시스템을 검증하여 보았다.

추후 통합된 독립형 태양광 발전 시스템을 검증하고 실제 회로를 구성하여 실험을 통한 정확한 검증이 필요하다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 정승환, "State-Space Averaging Method를 사용한 태양광 발전시스템에서의 백 컨버터 모델링", 전력전자학회 2009년도 추계 학술대회 논문집 2009.11, page(s): 152-154
2. 조영창, "모드결환을 고려한 양방향 DC-DC 컨버터의 디지털 전압 제어기 설계", 전력전자학회 2010년도 전력전자학술대회 논문집 2010.7, page(s): 6-8
3. H. W. Whittington, B. W. Flynn, D. E. Macpherson, "Switched Mode Power Supplies: Design and Construction" Research Studies Press Ltd, John Wiley & Sons Inc, pp.52-74.