

태양광 발전 시스템을 위한 부스트 컨버터의 회로 구성에 따른 직류측 스위치 손실 분석

DC Link Switch Loss Analyses according to Circuit Structures of the Boost Converter for Photovoltaic Generation System

이 승 요[†]
(Seung-Yo Lee)

Abstract - Switch losses directly affect the efficiency of power conversion systems and those have big differences according to the power consumed by load systems and the structures of power conversion circuits. In this paper, analyses for switch losses in DC link converter are performed based on the circuit structures of the DC/DC converter in photovoltaic generation system whose output power is varied according to the amount of solar radiation, temperature and partial shade on the solar modules. Boost converter is adopted as a DC link converter topology of the photovoltaic generation system and the loss analyses for the switches used in the boost converters are performed according to the circuit structures. Analyses like the things performed in this paper will be a prerequisite to designing the photovoltaic generation system whose output power is changed according to the environmental variations.

Key Words : Amount of solar radiation, Ambient temperature, Boost converter, DC/DC converter, Efficiency, Partial shade of solar module, Photovoltaic generation system, Switch loss

1. 서 론

스위치의 손실은 전력변환 시스템의 효율에 직접적인 영향을 끼치게 되며 시스템의 부하에서 소비되는 전력량과 전력변환 회로의 구성방식에 따라 현격한 차이를 보이게 된다. 태양광은 무한 청정에너지로서 태양광 발전은 연료비가 불필요하고 대기오염이나 폐기물에 의한 오염 발생이 없어 화석에너지의 고갈에 따른 대체 에너지로서 각광을 받고 있는데, 태양광을 이용한 태양광 발전시스템은 DC/DC 컨버터와 인버터 등의 전력변환 회로를 사용하여 구성된다[1-4]. 최근 대용량의 대규모 태양광 발전시스템의 설치가 활발하게 추진되어 왔으며 넓은 대 단위 면적에 태양전지를 설치함으로써 부분 음영에 의한 태양전지 모듈간의 상이한 발전 전력으로 인해 발생하는 문제점 등을 대처하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 뿐만 아니라 날씨의 기후 변화에 따라 태양전지로부터 발생하는 전력은 변동하게 되고 이에 연동하여 태양광 발전시스템에 사용되는 전력변환 회로의 구성 및 운전방식들이 전체적인 시스템의 효율에 영향을 주고 있다. 이에 따라서 태양광 발전 시스템의 효율을 향상시키기 위한 연구들이 진행되어 왔다[2,5].

태양광 발전 시스템에서 부분 음영이 발생하거나 날씨 변화에 의해 일사량이 변동되는 경우 태양전지 어레이(array)에서 발생하는 전력의 양이 변하게 되는데, 본 논문에서는 일사량, 온도 및 솔라 모듈의 부분음영 등에 의해 태양전지

의 출력이 변동되는 경우에 있어서 직류측 컨버터의 회로 구성방식에 따라 달라지는 직류측 컨버터의 스위치들에 대한 손실분석을 수행하도록 한다. 이때 태양광 발전 시스템의 직류측 컨버터 토폴로지로서 부스트 컨버터가 사용되었으며, 부스트 컨버터에 사용되는 스위치들에 대한 손실분석이 컨버터를 구성하는 회로 구조에 따라 수행되었다. 본 논문에서 수행되는 스위치 손실 분석은 출력이 환경 변화에 따라 변하는 태양광 발전시스템을 설계하는데 있어 반드시 선행되어야 할 하나의 절차로 여겨진다.

2. 본 론

2.1 계통연계 태양광 발전 시스템의 구성

그림 1은 일반적인 계통연계형 단상 태양광 발전시스템의 구성도를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 계통연계형 단상 태양광 발전시스템은 태양전지 어레이, 직류측 DC/DC 컨버터 및 변압기를 포함하는 인버터로 구성된다. 여기에서는 그림 1의 태양전지 어레이에서 발생하는 전력이 달라질 때 부스트 컨버터의 구성 방식에 따라 아울러 변동되는 컨버터의 스위치에 대한 손실을 분석하도록 한다.

2.2 계통연계 태양광 발전 시스템의 직류측 구성

태양광 발전시스템의 DC/DC 컨버터 구성에 따른 스위치 손실을 분석 및 비교하기 위하여 우선 그림 2와 그림 3에서와 같은 회로구조를 사용하도록 하였다. 그림 2는 태양광 발전 시스템에서 부분음영이 발생하는 등의 이유로 태양전

[†] 교신저자, 정회원 : 대림대학교 전기과 조교수

E-mail : sylee@daelim.ac.kr

접수일자 : 2012년 10월 10일

최종완료 : 2012년 11월 20일

지의 출력이 달라지는 경우 DC/DC 컨버터의 동작 대수를 결정하기 위한 팀 평선 (Team Function) 기능[2,5]을 갖는 시스템의 구성을 보여주고 있다.

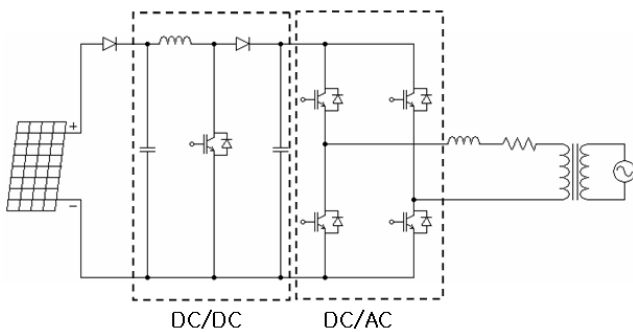


그림 1 계통연계 태양광 발전 시스템의 구성
Fig. 1 Configuration of the grid-interactive photovoltaic generation system.

이는 PV 어레이에서 발전되는 전력량에 따라 운전될 컨버터의 개수가 결정되도록 한다. 그림 3은 그림 2의 3대의 DC/DC 컨버터를 멀티-채널 (Multi-channel)로 컨버터간 120°의 위상 차를 두어 운전하도록 하는 경우를 나타내는 것으로 팀 평선 동작을 위한 태양광 발전 시스템 간의 연결 스위치를 제거한 형태의 구성을 나타내고 있다. 그림 2에서는 각각의 PV 어레이에서 발전되는 전력량에 따라 운전되는 DC/DC 컨버터의 수를 결정하도록 하는데, 그림 3에서는 손실비교를 위해 항상 3개의 채널을 갖는 멀티-채널 DC/DC 컨버터로 운전되도록 한다.

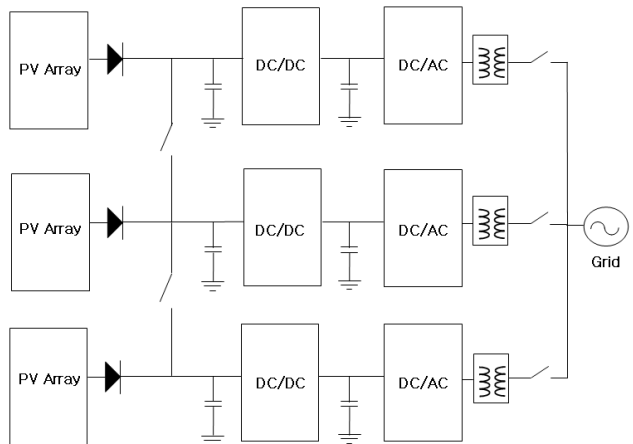


그림 2 팀 평선 기능을 갖는 태양광 발전 시스템의 구성
Fig. 2 Configuration of the grid-interactive photovoltaic generation system with the function of team operation.

DC/DC 컨버터의 구성 및 운전방식에 따른 손실 분석을 위해 그림 2의 운전방식을 표 1에 설명하였으며, 그림 3의 멀티-채널 방식 DC/DC 컨버터의 운전은 표 2에서와 같이 태양전지에서 발생하는 전력량에 상관없이 항상 채널간 120°의 위상차를 가지고 운전되도록 한다. 표 1에서 기호 I,

II, III은 각각의 PV에서 발생하는 전력의 양을 각각의 PV발생 전체 전력량에 대한 백분율로 나타낸 것으로, 각각의 PV에서 발생하는 전체 전력을 각각 5[kW]로 설정하였으며, 이때 기호 I, II, III에 대한 자세한 설명은 표 하단에 명기한 바와 같다. 또한 표 1의 A, B, C는 3개 PV 모듈 전체의 최대 전력량인 15[kW]를 100[%]로 하고, PV 모듈 3대에서 발생하는 각각의 전력을 합했을 때의 전력량을 15[kW]에 대한 백분율로 나타낸 것으로 이에 대한 설명을 역시 표 1 하단에 자세하게 나타내었다. 표 2는 주로 전류 분담(Current Sharing)기능을 갖도록 하기 위해 사용되는 멀티-채널 DC/DC 컨버터의 동작을 설명하기 위한 것으로, 태양전지 모듈에서 발생하는 전력량에 상관없이 항상 120°의 위상차를 갖는 3-채널 DC/DC 컨버터로 동작함을 설명하고 있다.

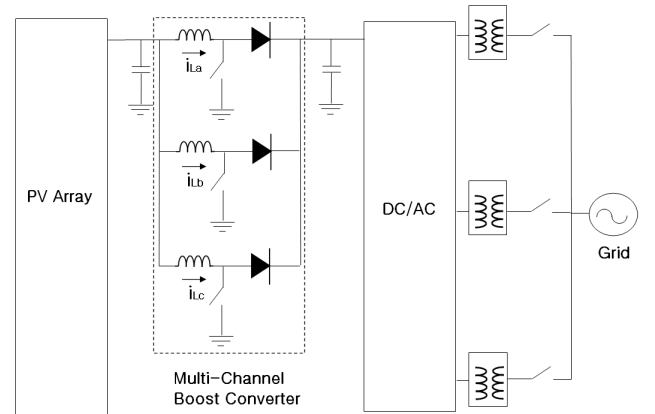
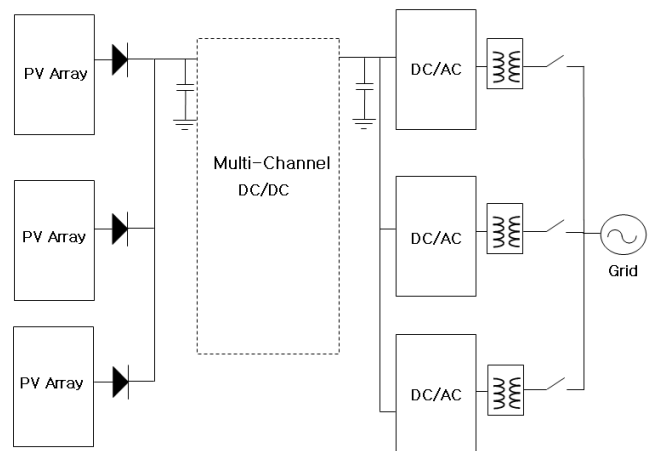


그림 3 멀티 채널 DC/DC 컨버터를 갖는 태양광 발전 시스템의 구성

Fig. 3 Configuration of the grid-interactive photovoltaic generation system with the multi-channel DC/DC converter.

2.3 직류측 DC/DC 컨버터의 스위치 손실 분석 결과

2.3.1 PSIM을 이용한 손실 분석 모델

Powersim Inc.의 PSIM은 전력변환 회로 시뮬레이션을 위한 소프트웨어로 Thermal Module을 통해 스위치의 손실을 분석할 수 있도록 하고 있다[6]. 여기에서는 PSIM의

Thermal Module을 이용하여 태양광 발전시스템의 발전전력과 직류단 DC/DC 컨버터의 구성 방식에 따른 스위치 손실 분석결과를 제시한다.

표 1 팀 평선 기능을 갖는 태양광 발전 시스템의 운전
Table 1 Operation of the photovoltaic generation system with the team function

PV1	PV2	PV3	전력(Total)	DC/DC 컨버터동작 대수
I	I	I	A	1대
		II	B	2대
		III	B	2대
	II	I	B	2대
		II	B	2대
		III	B	2대
II	I	I	B	2대
		II	B	2대
		III	B	2대
	II	I	B	2대
		II	B	2대
		III	C	3대
III	I	I	B	2대
		II	B	2대
		III	C	3대
	II	I	B	2대
		II	C	3대
		III	C	3대
III	I	I	B	2대
		II	B	2대
		III	C	3대
	II	I	B	2대
		II	C	3대
		III	C	3대

- I: 개별 PV 발생전력이 33[%] 이하
- II: 개별 PV 발생전력이 33[%]초과 66[%]이하
- III: 개별 PV 발생전력이 66[%]초과 100[%]이하
- A: 전체 발생전력이 33[%] 이하
- B: 전체 발생전력이 33[%]초과 66[%]이하
- C: 전체 발생전력이 66[%]초과 100[%]이하

표 2 멀티-채널 DC/DC 컨버터를 갖는 태양광 발전 시스템의 운전

Table 2 Operation of the photovoltaic generation system with the multi-channel DC/DC converter

PV Total Output Power	DC/DC 컨버터동작	채널수
A (33%전력이내)	Multi-Channel 채널간 120°위상차	3
B (66%전력이내)	Multi-Channel 채널간 120°위상차	3
C (100%전력이내)	Multi-Channel 채널간 120°위상차	3

그림 4는 PSIM의 Thermal Module을 이용한 스위치 손실 분석 모델을 나타내고 있는 그림으로 그림의 (a)는 팀 평선을 갖는 태양광 발전시스템의 DC/DC 컨버터 스위치 손실 분석 모델, 그림의 (b)는 멀티-채널 부스트 컨버터로 구성된 DC/DC 컨버터의 스위치 손실 분석 모델을 나타내고 있다.

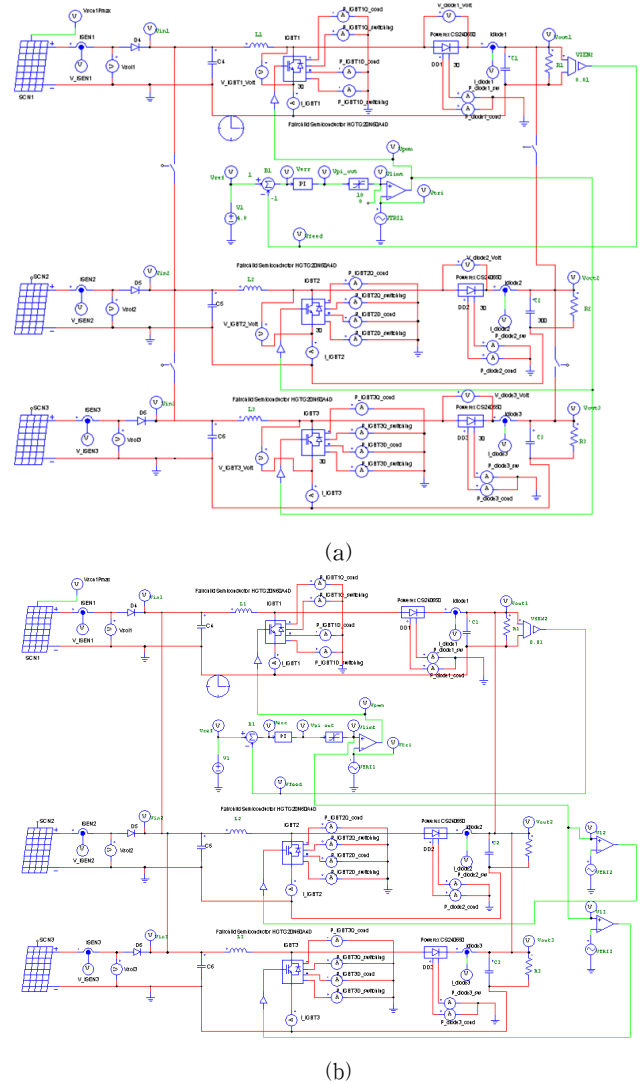


그림 4 PSIM의 Thermal Module을 이용한 스위치 손실분석 모델(a)팀평선을 갖는 시스템의 DC/DC 컨버터 스위치 손실 분석 모델(b)멀티-채널 DC/DC 컨버터의 스위치 손실 분석 모델

Fig. 4 Models for switch loss analyses using Thermal Module of PSIM. (a) Switch loss analysis model for the DC/DC converter in photovoltaic generation system with the team function. (b) Switch loss analysis model for the multi-channel DC/DC converter.

모델에서 인버터 단 이후는 저항을 이용하여 발생 전력량에 따라 전력을 소비할 수 있도록 등가적 모델로 구성하였

으며 부스트 컨버터의 손실 분석 대상 스위치는 Fairchild Semiconductor의 IGBT HGT20N60A4D와 Powerex의 Diode CS240650이다. 각각의 컨버터에 스위치를 1개씩 사용하는 경우와 5개씩을 병렬로 연결하여 사용하는 경우에 대한 손실 분석 결과를 각각 제시한다.

2.3.2 손실 분석 결과

그림 5는 스위치 손실 분석을 위한 DC/DC 컨버터의 회로 구조를 보여주고 있는 것으로 그림의 (a)는 각각의 DC/DC 컨버터가 IGBT 및 Diode를 각각 1개씩 가지고 있는 경우이며, 그림의 (b)는 각각 5개씩의 스위치를 병렬로 연결하여 사용하고 있는 경우이다. 그림 5의 (a), (b) 각각에 대하여 팀 평선 기능을 갖는 경우와 멀티-채널 DC/DC 컨버터로 동작하는 경우에 대한 스위치 손실 분석을 수행하도록 하였다.

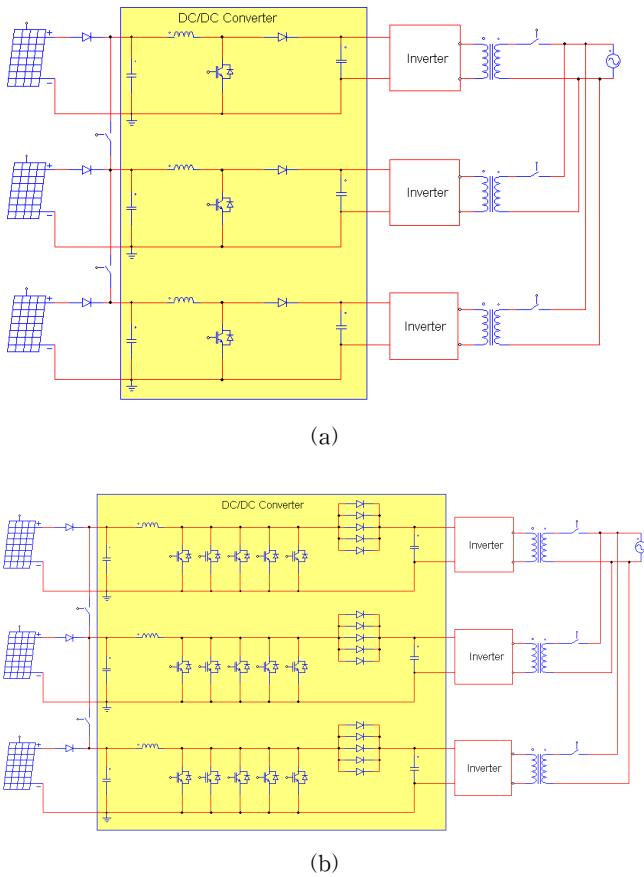
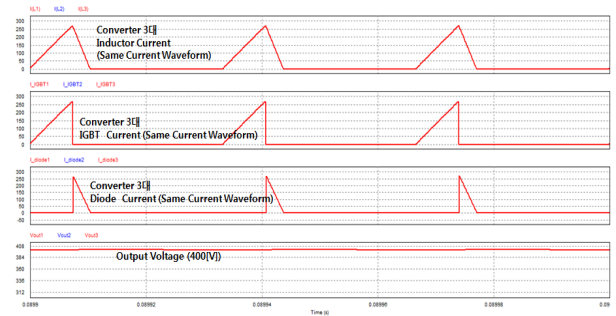


그림 5 스위치 손실 분석을 위한 DC/DC 컨버터의 회로 구조 (a)단일 스위치를 갖는 경우 (b) 5개 병렬 스위치를 갖는 경우

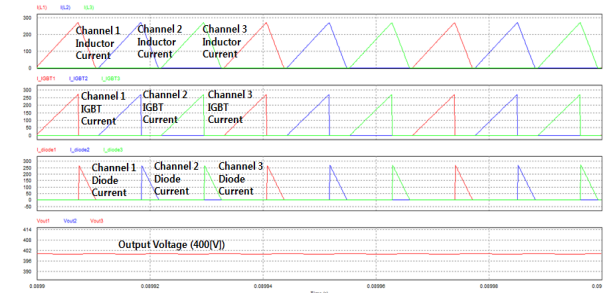
Fig. 5 DC/DC converter circuit structures for switch loss analyses. (a) DC/DC converter composed of single switch. (b) DC/DC converter composed of 5 switches.

그림 6은 DC/DC 컨버터의 구성방식에 따른 각 부 파형을 보여주고 있는 것으로 그림의 (a)는 팀 평선을 갖는

DC/DC 컨버터의 인덕터 전류, IGBT 전류, Diode 전류 및 DC/DC 컨버터의 출력전압 파형을 보여주고 있으며, (b)는 멀티-채널 DC/DC 컨버터로 동작하는 경우에 대한 인덕터 전류, IGBT 전류, Diode 전류 및 DC/DC 컨버터의 출력전압 파형을 보여주고 있다. 이때 전체 부하 전력량이 15[kW]인 경우로 가정하여 그림 5의 (a)에 대해 각각 팀평선 기능을 갖는 경우와 멀티-채널 DC/DC 컨버터로 동작하는 경우에 대한 파형을 그림 6의 (a)와 (b)에 예로써 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)의 경우 각 컨버터의 인덕터, IGBT 및 Diode에 흐르는 전류는 각 컨버터 마다 위상차 없이 흐르고 있는 것에 비해 그림 6(b)의 멀티-채널 DC/DC 컨버터로 동작하는 경우에 있어서는 인덕터, IGBT 및 Diode에 흐르는 전류가 각 채널 마다 120°씩의 위상차를 가지고 흐르고 있음을 알 수 있다. IGBT와 Diode에서 손실되는 전력을 분석하기 위하여 부스트 컨버터의 스위칭 주파수를 30[kHz]로 운전하였으며 사용된 인덕터의 인덕턴스는 3.2[μH]이었다. 손실분석은 태양광 발전시스템이 3[kW], 6[kW], 9[kW], 12[kW] 및 15[kW]로 전력을 발생할 때를 가정하여 그 결과를 제시하도록 하였다.



(a)



(b)

그림 6 DC/DC 컨버터의 구성방식에 따른 각 부 파형 (a) 팀 평선을 갖는 DC/DC 컨버터에 대한 인덕터 전류, IGBT, Diode 전류 및 컨버터 출력전압 파형 (b) 멀티-채널 DC/DC 컨버터에 대한 인덕터 전류, IGBT, Diode 전류 및 컨버터 출력전압 파형

Fig. 6 Waveform of each part according to the DC/DC converter circuit structure. (a) Waveforms of inductor current, IGBT current, diode current and output voltage for the DC/DC converter with the team function. (b) Waveforms of inductor current, IGBT current, diode current and output voltage for the multi-channel DC/DC converter.

그림 7~8은 태양광 발전시스템에서 발전되는 발생전력량에 따라 분석된 스위치 손실 결과를 나타내고 있는 것으로, 그림 7은 발생전력에 따라 각각의 DC/DC 컨버터에서 발생되고 있는 IGBT 및 다이오드의 손실을 전도성 손실 (Conduction Loss) 및 스위칭 손실 (Switching Loss)로 분리하여 각각 나타내었다. 그림 8의 경우는 각 컨버터 구성에 따라 발생하는 스위치 손실을 태양광 발전시스템의 발생전력량에 따라 전체적인 값으로 그래프를 통하여 나타낸 것이다.

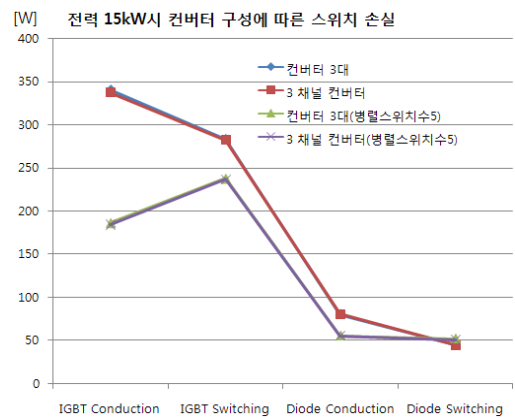
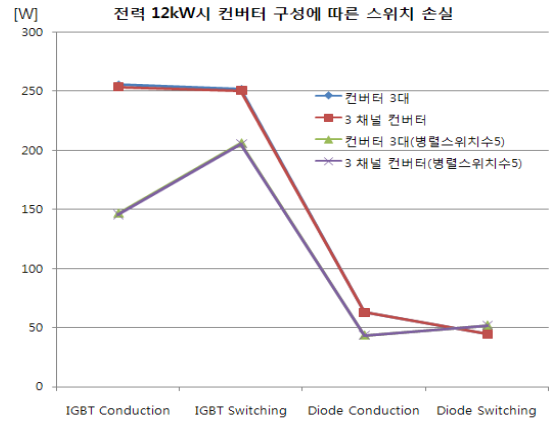
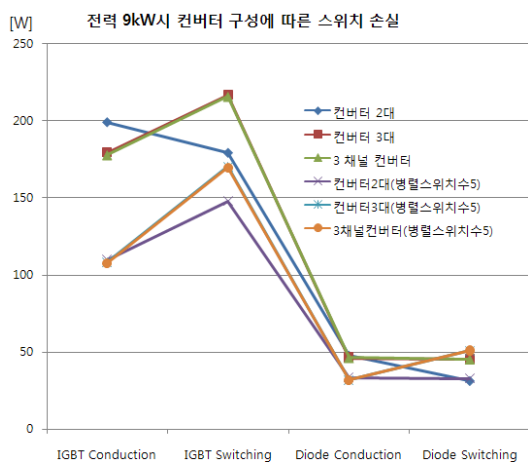
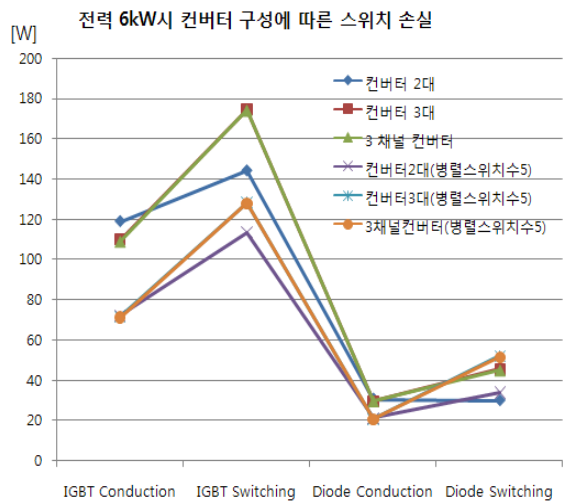
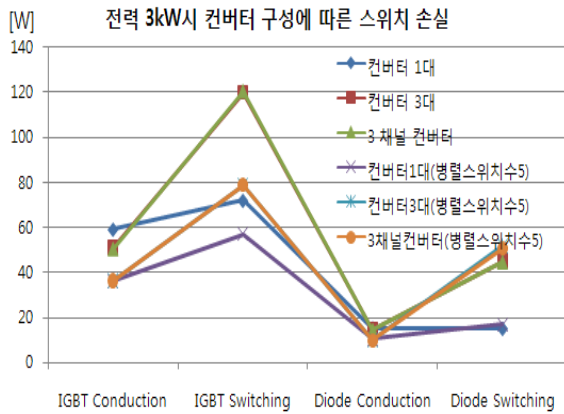
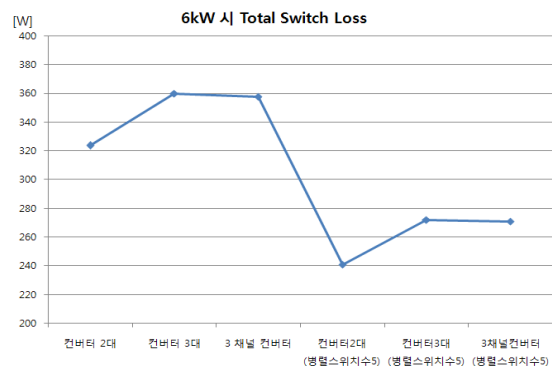
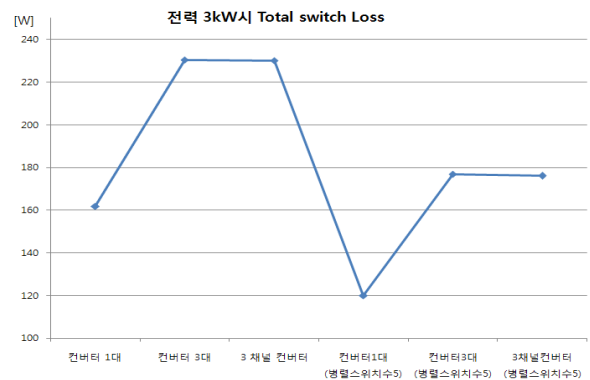


그림 7 발생전력에 따른 스위치 손실 결과
Fig. 7 Switch loss analysis results according to the power generated.



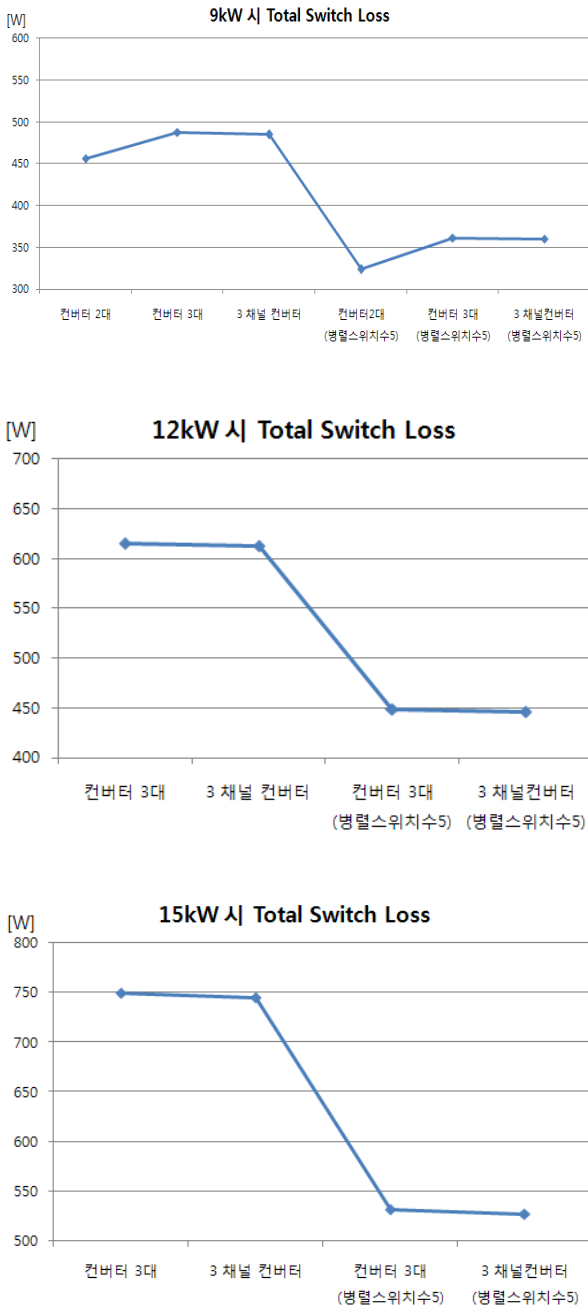


그림 8 발생전력에 따른 각 DC/DC 컨버터에서의 전체 스위치 손실 결과

Fig. 8 Total switch losses in each DC/DC converter according to the power generated.

그림 7~8에서 ‘컨버터1대’, ‘컨버터2대’, ‘컨버터3대’ 및 ‘3 채널컨버터’라고 하는 의미는 기본적으로 표 1 및 표 2에서 발생전력량에 따라 운전되는 컨버터의 대수와, 사용되고 있는 멀티-채널 컨버터의 채널 수가 3채널임을 각각 의미한다. 그러나 그림에서는 손실 비교를 위하여 컨버터 1대 또는 2대로 운전이 가능한 3[kW](전체15[kW]대비20%)~9[kW](전체15[kW]대비60%) 전력 범위에서도 3대의 컨버터를 모두 운전하여 발생하는 스위치 손실을 분석하였으며 그 결과를 비교할 수 있도록 그림에 함께 나타내었다. 아울

러 그림의 표기에서 ‘병렬스위치수5’는 그림 5의 (b)에서와 같이 각 컨버터에 병렬 연결되는 스위치의 개수가 5개임을 의미한다.

그림 7로부터 IGBT 스위치의 전력손실은 전력범위 9[kW]까지는 대체적으로 IGBT와 Diode 모두에 있어서 전도성 손실 보다는 스위칭 손실이 큰 것으로 나타났으며, 12[kW]이상의 전력범위에 있어서는 그림 5의 (b)와 같이 DC/DC 컨버터에 스위치를 병렬로 여러개 사용하는 경우에는 앞에서와 마찬가지로 스위칭 손실이 더 크나, 그림 5(a)와 같이 단일 스위치를 사용하는 경우에 있어서는 스위칭 손실보다 전도성 손실이 더 커지게 됨을 알 수 있다. 그림 8은 각각의 경우에 대한 직류측 전체 스위치 손실을 보여주는 것으로 3[kW] 전력에서는 컨버터 1대, 6[kW]~9[kW]에서는 컨버터 2대를 사용하는 경우가 스위치의 손실 측면에서 가장 유리함을 알 수 있으나, 컨버터 1대~2대를 사용하기가 어려운 12[kW]이상의 전력 범위에서는 컨버터 3대를 운전하는 경우 멀티-채널 컨버터를 사용하는 것이 그렇지 않은 경우 보다 스위치 손실 면에서 유리함을 알 수 있다. 이는 태양광 발전 시스템의 출력 전력량이 커질수록 더욱 두드러진 차이를 보일 것으로 예상된다.

3. 결 론

태양광 발전 시스템의 직류측 DC/DC 컨버터로서 부스트 컨버터를 사용하고, 부스트 컨버터의 회로 구성 방식에 따른 직류측 DC/DC 컨버터의 스위치 손실을 PSIM의 Thermal Module을 이용하여 분석하였다. 현재 많이 적용되고 있는 태양광 발전 시스템의 팀 평선 구현과 시스템의 효율을 최적화하기 위해서는 시스템의 구성 및 제작에 앞서 본 논문이 제시하는 바와 같은 스위치 손실에 대한 분석이 선행되어야 할 필요가 있을 것이며, 여기에서는 발전 전력량 및 직류측 회로 구성방식에 따른 스위치 손실을 분석하였으나 향후에는 인덕터 및 커패시터와 같은 수동소자를 포함한 전체적인 시스템의 손실을 손쉽게 빠르게 분석하여 시스템의 효율을 시스템 제작 전에 전체적으로 예측하기 위한 방안을 강구해 나갈 필요가 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] 이기욱 외 6인, “계통연계형 태양광 PCS의 병렬운전”, 전력전자학술대회 논문집, pp. 299-301, 2006.
- [2] 이종필 외 4인, “대용량 태양광 PCS용 DC/DC 컨버터의 병렬운전”, 전력전자학술대회 논문집, pp. 97-98, 2010.
- [3] 한찬영 외 4인, “계통연계형 태양광 발전 시스템의 태양전지 출력단 전압제어에 관한 연구”, 추계전력전자학술대회 논문집, pp. 119-123, 2000.
- [4] 유권중 외 3인, “MPPT 제어 알고리즘 고찰 및 효율시험 평가법”, 전력전자학회 논문지, 제6권 제2호, pp. 164-172, 2001.
- [5] Witold Maranda et al., “Optimization of the master-slave inverter system for grid-connected photovoltaic plants”, Energy Convers. Mgmt, Vol. 39,

No. 12, pp. 1239-1246, 1998.

[6] PSIM User's Guide, Powersim Inc.

저 자 소 개



이 승 요 (李 承 約)

1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업.
1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 9월~2003년 9월 버지니아공대(Virginia Tech) 박사후 연구원.

2003년 10월~2004년 10월 Intronic, Inc.(U.S.A.) Research Engineer. 2004년 12월~2007년 3월 삼성전자(주) DM총괄 영상 디스플레이 사업부 책임연구원. 2007년 3월~2008년 2월 (주)이시스 이사. 2008년 3월~현재 대림대학교 전기과 조교수.

Tel : (031) 467-4862

Fax : (031) 467-4861

E-mail : sylee@daelim.ac.kr