

# Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터를 이용한 고효율 PV 스트링 Power Optimizer 개발

유기범<sup>1</sup>, 김형진<sup>1</sup>, 하이뜨란<sup>1</sup>, 최세완<sup>1</sup>, 최운성<sup>2</sup>, 최영규<sup>2</sup>, 이정욱<sup>2</sup>, 주상현<sup>2</sup>  
서울과학기술대학교<sup>1</sup>, 다스텍<sup>2</sup>

## Development of High Efficiency PV String Power Optimizer using Dual-Bridge LLC Resonant Converter

Gibum Yu<sup>1</sup>, Hyungjin Kim<sup>1</sup>, Hai N. Tran<sup>1</sup>, Sewan Choi<sup>1</sup>, Wunsung Choi<sup>2</sup>, Yeounggyu Choi<sup>2</sup>,  
Jungouk Lee<sup>2</sup>, Sanghyun Joo<sup>2</sup>  
Seoul National University of Science and Technology<sup>1</sup>, DASS Tech Co., Ltd<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터를 이용한 고효율 PV 스트링 Power Optimizer를 제안한다. 제안하는 Power Optimizer는 LLC 공진형 컨버터를 이용하여 모든 스위치의 ZVS 턴온 및 다이오드의 ZCS 턴오프를 성취하여 고효율을 달성할 수 있다. 또한 컨버터 토폴로지는 하프브릿지 회로와 풀브릿지 회로가 통합된 Dual-Bridge 구조를 적용하여 PV 스트링의 넓은 입력전압 범위(300V-900V) 조건에서도 정전압 출력이 가능하다. 본 논문에서는 6.25kW급 시작품 실험을 통하여 제안하는 Power Optimizer의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

태양광 에너지는 다양한 신재생에너지원 중에서 화석연료를 대체할 가장 주목받는 에너지원이다. 태양광 발전 시스템의 기술 발전과 규모의 경제 덕분에 균등화발전비용(Levelized Cost of Electricity)이 현재 가장 저렴한 에너지로 평가받고 있다. 과거 태양광 발전시스템은 주로 중앙 집중형 인버터로만 구성되었으나, 최근 컨버터를 추가하여 MPPT를 컨버터가 수행하는 시스템으로 변화하는 추세이다. 왜냐하면 태양광발전 시스템은 양산 시 제작에 의한 모듈 간의 미스매치, 패널 노후화에 의한 스트링 간의 미스매치, 스트링 표면의 음영, 이물질에 의한 모듈 간 미스매치 등으로 인해 모듈 또는 스트링 간의 발전 전력 편차를 가져온다.<sup>[1]</sup> 특히 음영발생에 따른 미스매치는 100%의 모듈 또는 스트링 간 편차를 발생시키므로 발전량이 가장 작은 모듈을 기준으로 하향평준화가 되어 에너지 생산을 저하시킨다.<sup>[1]</sup> 따라서 일정 단위의 멀티스트링에 컨버터를 삽입하여 에너지 생산을 저하시키는 외부 환경요인의 영향을 최소화하여 에너지 생산량을 극대화 할 수 있는 Power Optimizer의 사용이 점차 증가하고 있다.

본 논문에서는 정전압 출력에서 PV 스트링의 넓은 입력전압 범위를 만족하는 Dual-Bridge LLC 공진 컨버터를 이용한 PV 스트링 Power Optimizer를 개발하였다. 그림 1은 병렬로 이루어진 Power Optimizer와 계통연계 인버터로 구성되어 있는 PV 멀티스트링 발전시스템의 PCS 구성도이다. 각각의 Power Optimizer는 PV 스트링의 전압을 MPPT 제어를 하게 되고 계통연계 인버터는 DC Link 전압을 제어하게 된다. PV 스트링에서 생성된 전력을 각각의 Power Optimizer와 계통연계 인버터를 통해 계통으로 전력을 공급한다.

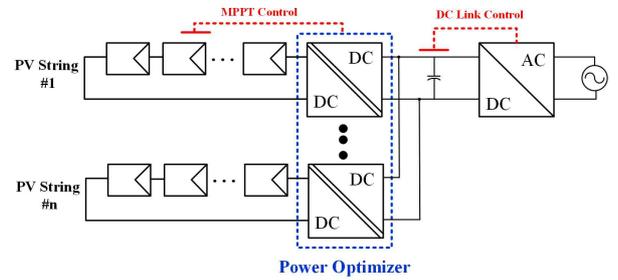


그림 1. Power Optimizer를 이용한 PV 스트링 발전시스템의 PCS 구성도

### 2. 제안하는 PV 스트링 Power Optimizer

제안하는 PV 스트링 Power Optimizer에서 이용하는 Dual-Bridge LLC 공진 컨버터는 그림 2와 같이 풀브릿지와 하프브릿지가 통합된 구조로 넓은 입력전압 범위를 갖는다.<sup>[2]</sup> Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터는 기존 LLC 공진형 컨버터에 비해 2개의 스위치가 추가된 구조로서 S1, S2는 0.5의 고정된 듀티로 상보적으로 동작하게 되고 S3, S5 그리고 S4, S6 는 D 만큼의 듀티로 상보적으로 동작하게 되고 각각은 180도 위상차이로 동작하게 된다. 일반적인 LLC 공진형 컨버터와 같이 경부하부터 풀부하까지 모든 스위치의 ZVS 턴온 및 모든 다이오드의 ZCS 턴 오프를 성취하고 낮은 스위치의 턴 오프 전류로 고효율과 높은 전력밀도를 달성할 있다. 또한 같은 승압비를 가질 때 주파수 제어로 출력전압을 조절하는 LLC 컨버터와 달리 PWM제어로도 출력전압을 조절하기 때문에 더 큰 차화 인덕턴스를 설계할 수 있어 자화인덕턴스 전류로 턴 오프하는 LLC 컨버터에서의 스위치 턴 오프 손실을 줄일 수 있다.

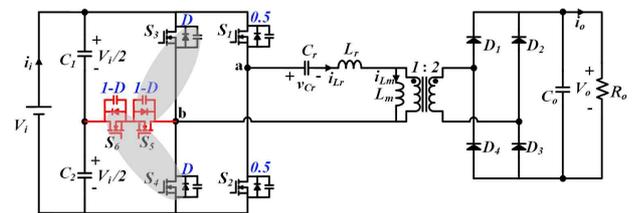


그림 2. Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터

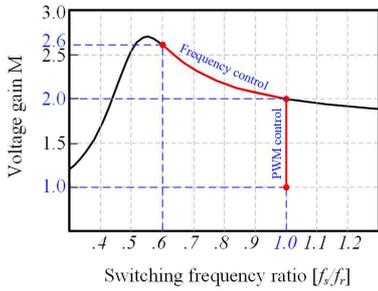


그림 3. Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 곡선

그림 3의 공진탱크의 Q팩터가 0.9일 때의 Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 곡선이다. 승압비가 1에서 2인 구간은 S3, S4의 듀티를 가변하여 PWM 제어를 하게되고 승압비가 2이상인 구간에서는 S3,S4의 듀티를 0.5로 고정하고 주파수를 가변하여 풀브릿지로 동작하게 된다. 승압비에 따라 PWM 제어와 주파수 제어를 함으로서 PV의 넓은 전압범위 (300V - 900V)를 만족 할 수 있다.

### 3. 실험 결과

제한하는 PCS의 타당성을 입증하기 위해 아래와 같은 2가지의 사양으로 시작품을 제작하여 실험을 하였다.

- $P_o = 6.25\text{kW}$
- $V_{MPPT} = 650\text{V}$
- $V_i = 300\text{V}-800\text{V}/400\text{V}-900\text{V}$
- $V_o = 800\text{V}/900\text{V}$
- $f_s = 100-150\text{kHz}$

그림 4는 출력이 800V로 고정인 상태에서  $V_i = 300\text{V}$  조건에서의 실험파형이다. S3, S4의 듀티를 0.5로 고정하고 모든 스위치의 주파수를 110 kHz로 가변하여 입력전압이 300V로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이때는 풀브릿지로 동작하여 a, b 양단에는 입력전압과 같은 크기의 전압이 걸리게 된다. 그림 5는 출력전압은 800V로 고정인 상태에서  $V_i = V_{MPPT}$  조건에서의 실험파형이다. 입력전압이 400V-800V구간에 있으므로 PWM 제어를 통해 입력전압을 650V로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이때 S3, S4가 턴 온 되어져 있는 구간동안 a, b 양단에는 입력전압과 같은 크기의 전압이 걸리게 되고 S3, S4가 턴 오프 되어 있는 구간 동안은 a, b 양단에 입력전압의 절반의 크기의 전압이 걸리게 된다. 그림 6은 출력이 800V로 고정인 상태에서  $V_i = 800\text{V}$  조건에서의 실험파형이다. S3, S4는 항상 턴 오프되고 S5, S6는 항상 턴 온이되는 하프브릿지로 동작하여 입력전압과 출력전압이 같아지도록 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이때의 a,b 양단에는 하프브릿지로 동작하므로 입력전압의 절반의 크기의 전압이 걸리게 된다.

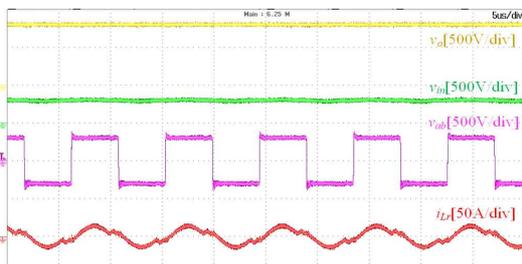


그림4.  $V_i = 300\text{V}/V_o = 800\text{V}$  풀브릿지 조건 실험파형

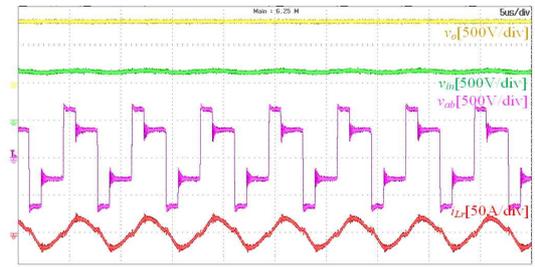


그림 5.  $V_i = 650\text{V} / V_o = 800\text{V}$ ,  $V_i = V_{MPPT}$  조건 실험 파형

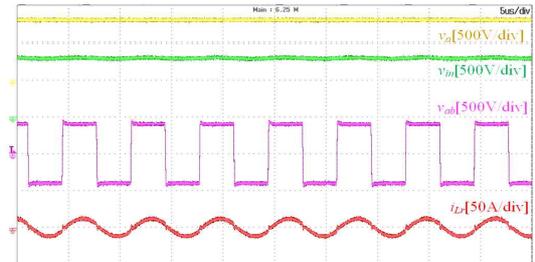


그림6.  $V_i = 800\text{V}/V_o = 800\text{V}$  하프브릿지 조건 실험파형

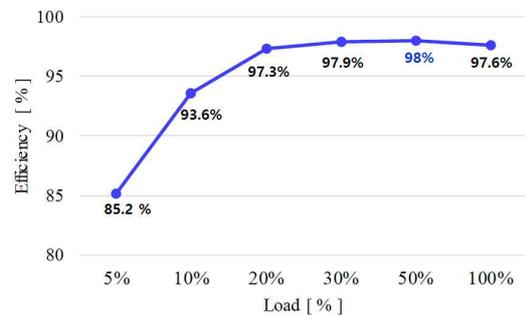


그림 7. Power Optimizer 효율 (측정:YOKOGAWA WT3000)

그림 7는  $V_i = V_{MPPT} / V_o = 800\text{V}$  조건에서 각 부하별로의 제안하는 Power Optimizer의 효율그래프이다. 최고효율을 98.0%@3.1kW를 달성하였고 각 부하별로 가중치를 두어 계산하는 유효효율은 97.17%를 달성하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터를 이용한 PV스트링 Power Optimizer 제안하였다. 또한 6.25kW급 시작품 실험을 통하여 제안하는 Power Optimizer의 동작과 성능을 검증하였고 Dual-Bridge LLC 공진형 컨버터를 이용함으로써 기존 LLC 컨버터보다 더 큰 자화인덕턴스를 설계할 수 있어 높은 효율을 달성할 수 있었다.

### 참고 문헌

[1] 민준기. (2018). 태양광 마이크로 컨버터 (Power Optimizer) 기술 동향. 한국태양광발전학회지, 4(2), 25-32.  
 [2] X. Sun, X. Li, Y. Shen, B. Wang, and X. Guo, "Dual-Bridge LLC Resonant Converter With Fixed-Frequency PWM Control for Wide Input Applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 1, pp. 69 - 80, Jan. 2017.