

태양광 발전용 2단 구성방식의 DC/DC 컨버터

윤광호, 심치화, 서함, 김은수*, 오성진*, 배영상*
 전주대학교, 카코뉴에너지(주)*

Two Stage DC/DC Converter for Photovoltaic System

K.H Yoon, C.H Sim, XU Han, E.S Kim*, S.J Oh*, Y.S Bea*
 JeonJu University, KACO new energy Inc.*

1. 서론

태양광 일사량에 따라 태양광모듈전압($270V_{DC} \sim 575V_{DC}$)이 가변하게 되는데, 일정한 출력전압 및 MPPT 제어를 하기 위해서는 전력변환장치를 사용해야 한다. 태양광발전 PCS(Power Conditioning System) 전력변환장치들 중에 비절연형 승압컨버터만 구성하여 발전시스템을 적용하였을 경우에는 부품 수 감소와 고 효율특성을 얻을 수 있지만 계통연계 시 전기적인 절연을 위해 50/60Hz 변압기를 사용하여 PCS를 구성하기 때문에 중량 및 부피가 증가되는 문제점을 가지게 된다. 비절연형 승압컨버터와 함께 절연형 고주파 DC/DC 컨버터로 PCS를 위한 2단구성(Two Stage)의 DC/DC 컨버터를 사용할 경우 고주파 변압기를 사용함으로써 중량 및 부피가 작아지는 장점을 가지고 있다. 최근 효율 개선 및 최적회로설계를 위해 비절연형 승압컨버터에서는 일정출력전압 또는 MPPT제어를 하고 LLC 공진컨버터는 듀티(Duty)와 스위칭주파수가 변동이 없는 고정시비율로 동작하도록 하여 제어설계의 복잡성을 줄이고 회로가 갖는 스트레스를 분담할 수 있도록 구성된 2단 구성방식 DC/DC 컨버터가 PCS에 적용되고 있다.^[1, 2] 하지만 넓은 입력전압 및 부하범위에서 비절연형 승압컨버터와 LLC 공진컨버터 모두 다 동작을 하게 되면 각 컨버터에 적용된 스위칭소자 및 부품에 손실들이 발생하며 전압, 전류 스트레스를 각각 부담하여 전체적인 평균효율을 감소시키는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자, 낮은 태양광모듈 전압범위($270V_{DC} \sim 430V_{DC}$)에서는 비절연형 승압컨버터와 LLC 공진컨버터 두 컨버터가 동작하고, 높은 태양광모듈 전압범위($430V_{DC} \sim 575V_{DC}$)에서는 비 절연형 승압컨버터는 동작을 멈추고 LLC 공진컨버터만 스위칭주파수 제어를 통해 일정출력전압($V_o=575V_{DC}$) 제어 또는 MPPT 전력제어를 하게 된다.

그러므로 제안된 태양광발전용 2단 구성 방식의 DC/DC 컨버터에서는 비절연 승압컨버터 출력전압 $430V_{DC}$ 이상에서 비절연 승압컨버터는 동작을 하지 않고 LLC 공진컨버터만 동작되기 때문에 넓은 입력전압 및 부하범위에서 전체적인 평균효율을 개선 할 수 있고, 1차측 입력단 부분에 적용된 스위칭소자들은 낮은 전압정격을 적용 할 수 있어 전체시스템 구성부품의 단가(cost)를 낮출 수 있는 방식을 제안하여 적용 실험하였다.

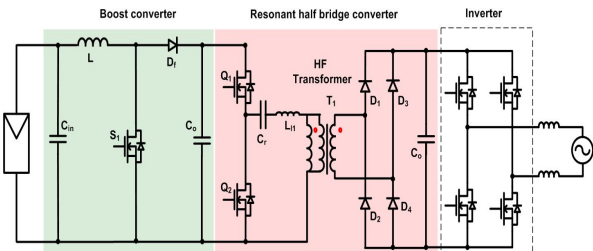


그림1. 2단 구성 DC/DC컨버터가 적용된 태양광발전시스템

2. 본론

2.1 시스템의 구성

그림 2의 태양광발전시스템(PCS)은 Interleaved Boost Converter와 Two Tank LLC 공진컨버터로 구성되어 있고, 적용된 Interleaved Boost Converter는 효율개선을 위해 병렬 연결되어 180도로 위상지연 스위칭제어 함으로써, 각 소자에 흐르는 전류를 절반으로 분담 할 수 있고, 입력전류와 출력전류의 리플을 저감 할 수 있는 회로이다. 적용된 Two Tank LLC 공진컨버터는 두 개의 변압기(T_1, T_2)를 각각의 독립된 공진탱크회로로 구성함으로써 주 스위칭 소자 Q_1 이 턴 오프 되고 Q_2 가 턴 온할 때 입력 측 전류는 공진커패시터 C_{r1}, C_{r3} 를 통하여 전류가 흐르면서 충전하는 공진회로가 동작되고, 공진 커패시터 C_{r2}, C_{r4} 를 통하여 방전하는 공진회로가 동작된다. 또한 Q_1 이 턴 온 되고 Q_2 가 턴 오프 되었을 때 입력측 전류는 공진커패시터 C_{r2}, C_{r4} 를 통하여 충전하는 공진회로가 동작되고, 공진커패시터 C_{r1}, C_{r3} 를 통하여 방전하는 공진회로가 동작된다. 따라서 Two Tank LLC 공진컨버터 1차측의 각 공진탱크회로에 흐르는 공진전류 및 자화전류를 절반으로 분담할 수 있기 때문에 변압기(T_1, T_2)에서 발생하는 열적 스트레스를 최소화 할 수 있고, 슬림화 하는데 장점을 가지는 회로이다. 또한 공진 커패시터가 주 스위칭소자와 대칭으로 병렬 구성되어 있어 1차측 공진회로에 흐르는 전류스트레스를 저감할 수 있으므로 공진커패시터의 용량과 부피를 줄일 수 있는 장점을 가지게 된다. 두 개의 변압기(T_1, T_2) 2차측에 흐르는 전류의 불균형을 방지하기 위하여 각각의 2차측 권선을 상호 직렬 연결하였고, 2차측 정류회로에는 두 배의 전압이득을 가질 수 있는 Voltage Doubler 회로를 적용하였다.^[3]

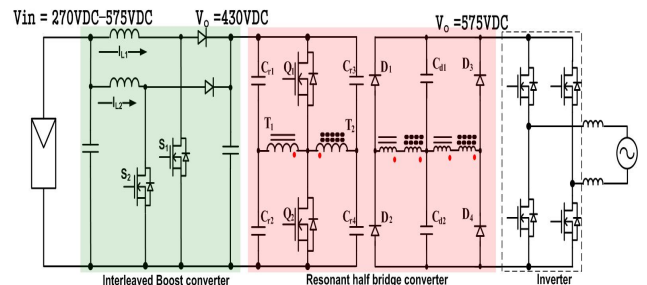


그림 2. 제안된 2단 구성 DC/DC컨버터 적용 태양광발전시스템

2.2 비 절연 승압컨버터 동작 및 효율특성

그림 3에서 나타낸 Interleaved Boost Converter의 주회로 및 각 부 파형에서 보듯이 주 스위칭소자 S_1 이 도통하면 인덕터 L_1 에 에너지를 축적하고 인덕터에 흐르는 전류 I_{L1} 은 증가하게

된다. 같은 시간에 스위칭소자 S_2 를 차단함에 따라 인덕터 L_2 에 축적되어 있던 에너지가 출력측 커패시터로 전달되고, 인덕터에 흐르는 전류 I_{L2} 는 감소하게 된다. 이와 반대로 주 스위칭소자 S_1 이 차단되고 주 스위칭소자 S_2 가 도통할 때 인덕터 L_1 에 축적되어있던 에너지는 출력측 커패시터로 전달되고 인덕터에 흐르는 전류 I_{L1} 는 감소하며, 인덕터 L_2 에 에너지를 축적하고 인덕터에 흐르는 전류 I_{L2} 는 증가하게 된다.

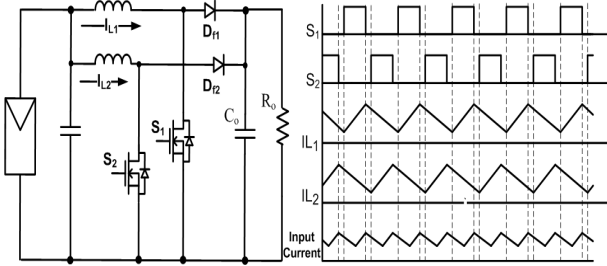


그림 3. 적용된 Interleaved Boost Converter 각부 파형

이와 같이 동작하게 되는 Interleaved Boost Converter는 넓은 입력전압(270V_{DC} 430V_{DC})에서 일정한 출력전압(430V_{DC})을 제어하기 위하여 PWM제어IC(UCC28220)를 적용하였고, 그림 6(a)에 나타난 효율측정 실험결과처럼 입력전압 270V_{DC}에서는 최대효율 및 평균효율은 98.16%, 97.51%의 효율특성을 보였고, 입력전압 400V_{DC}에서는 최대효율 및 평균효율은 98.5%, 97.69%의 높은 효율을 보였다.

2.3 Two Tank LLC공진컨버터 이득 및 효율특성

Two Tank LLC공진컨버터 주회로는 변압기(T_1)와 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})로 구성된 공진회로1과 변압기(T_2)와 공진커패시터(C_{r3} , C_{r4})로 구성된 공진회로2로 되어있다. 두 개의 공진회로가 동작 시 2개의 입력전원이 존재하기 때문에 별도의 전압원(V_{ab} , V_{cd})를 T형 등가회로로 변환하기 위해서는 중첩원리(Superposition Theory)를 적용하여 등가회로로 변환하는 방법으로 얻어진 전압 V_{ab} , 출력전압 V_{o1} 에 대한 전압이득특성식(G_1)을 식 1에 나타내었고, 전압 V_{cd} 와, 출력전압 V_{o2} 에 대한 전압이득특성식(G_2)을 식 2에 나타내었다. 따라서 두 개의 공진회로를 가지는 LLC공진컨버터의 전압이득특성(G)은 식 3에서처럼 나타낼 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\left(1 + A_1 - \frac{1}{w^2 L_{m1} C_{r1}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s11}}{N^2 R_{ac1}}\right) + j \frac{w L_{m1}}{N^2 R_{ac1}} \left[\left(1 + A_1 - \frac{1}{w^2 L_{m1} C_{r1}}\right) (B_1 + 1) - 1\right]}$$

$$G_2 = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\left(1 + A_2 - \frac{1}{w^2 L_{m2} C_{r2}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac2}}\right) + j \frac{w L_{m2}}{N^2 R_{ac2}} \left[\left(1 + A_2 - \frac{1}{w^2 L_{m2} C_{r2}}\right) (B_2 + 1) - 1\right]}$$

$$G = G_1 + G_2$$

여기서 L_{m1} , L_{m2} 는 변압기(T_1 , T_2)의 자화 인덕턴스를 나타내었고, R_{ac1} , R_{ac2} 는 LLC공진컨버터의 등가부하 AC저항을 나타내었다. 본 논문에서 설계된 변압기를 직접 제작하여 측정된 파라미터를 표 1에 나타내었고, 설계된 변압기를 제작, 측정된 파라미터를 적용하여 부하($N^2 R_{ac}$)변화에 따른 전압이득특성 $G(V_o/V_{in})$ 을 알아보기 위하여 Math CAD시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 부하가 단락($N^2 R_{ac1} = N^2 R_{ac2} = 0$)일 때의 주파수를 기준으로 기준주파수를 $f_n(f_s/f_r)$ 으로 나타내었다. 이때 공진주파수는 126.5kHz이다. 그림 6(b)에서 나타난 것처럼 Two Tank LLC 공진컨버터의 효율특성에서는 입력전압범위(270V_{DC} 430V_{DC})에서는 Interleaved Boost 컨버터가 출력전압을 430V_{DC}로 제어하기 때문에 430V_{DC} 입력전압에서

최대 효율 및 평균효율은 97.5%, 96.57%의 높은 효율을 보였고, 입력전압 550V_{DC}에서의 최대효율 및 평균효율은 97.82%, 97.14%의 높은 효율을 보였다. Two Tank LLC 공진컨버터에 적용된 스위칭소자의 R_{ds}(0.07Ω)저항이 작아 불연속 구간동작 중 순환전류가 흐른다 할지라도 전체적인 도통손실에 큰 영향을 주지 않은 것을 볼 수 있다.

표 1 측정된 변압기 파라미터

	변압기 T ₁		변압기 T ₂	
1차측누설인덕턴스	L_{l11}	21.02uH	L_{l12}	21.51uH
2차측누설인덕턴스	L_{l21}	2.498uH	L_{l22}	2.2915uH
자화인덕턴스	L_{m1}	267uH	L_{m2}	260.2uH
등가누설인덕턴스	L_{eq1}	43.85uH	L_{eq2}	42.58uH
$N(n_1/n_2)$		2 (22/11)		2 (22/11)
공진커패시터(C_{r1} , C_{r2} , C_{r3} , C_{r4})	22nF			
적용코아	코아: EER4042			

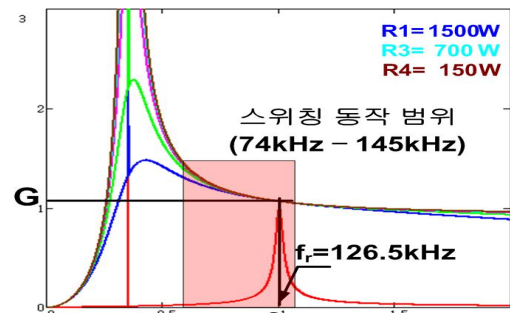


그림 4. 부하변화에 따른 전압이득 특성

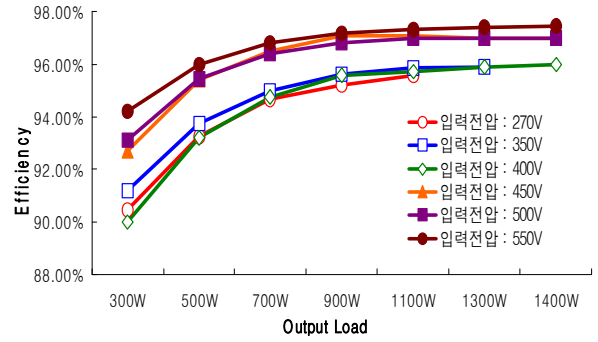
3. 실험결과

본 논문에서는 2kW 정격출력용량을 가지는 Interleaved Boost 컨버터와 Two Tank LLC 공진컨버터로 구성된 Two Stage DC/DC 컨버터를 제작하였고, 실험실 전원장치용량 조건상 1.4kW로 적용 실험하였다. 입력전압 270V_{DC}, 400V_{DC}, 450V_{DC}, 550V_{DC}의 4가지의 실험조건으로 실험 및 효율측정 하였으며, Two Tank LLC 공진컨버터의 출력전압은 575V_{DC}, 출력용량 1400W(575V_{DC}/2.434A)에 대하여 실험하였다. 적용된 2단 구성 태양광 발전 DC/DC Converter의 실험조건과 주요 정격에 대하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 2단 구성 태양광 발전 DC/DC Converter 주요 정격

Interleaved Boost Converter	입력전압(V_{in})	270V _{DC} 575V _{DC}
	출력전압(V_o)	430V _{DC}
	스위칭소자(S_1 , S_2)	SPW 47N60 650V, 47A
	환류다이오드(D_{f1} ~ D_{f2})	IDH10S60C 600V, 10A
Two Tank LLC 공진컨버터	적용된 제어 IC	UC28220
	입력전압(V_{in})	430V _{DC} 575V _{DC}
	출력전압(V_o)	575V _{DC}
	출력용량(P_o)	1400W(2kW)
	공진주파수(f_r)	126.5kHz
	스위칭소자(Q_1 , Q_2)	SPW 47N60 650V, 47A
출력 정류다이오드(D_1 ~ D_4)	IDH10S60C 600V, 10A	
적용된 제어IC	MC34067	

실험결과 Two Tank LLC공진컨버터의 단자전류 (I_{T1})는 단자전압(V_{ab})에 대하여 항상 지상전류가 흐르고 있기 때문에 주 스위칭소자(Q1, Q2)는 모든 부하범위에서 항상 영전압스위칭(ZVS) 동작됨을 확인할 수 있다. 또한 효율측정 결과 Interleaved Boost Converter의 출력전압을 430V_{DC}로 제어 하므로 입력전원 전압이 430V_{DC} 이상 일 때는 Interleaved Boost Converter는 동작을 멈추고 Two Tank LLC공진컨버터만 동작하여 전체적인 평균효율을 개선할 수 있었다. 그림 6(c)에서처럼 입력전원 전압이 270V_{DC}에서의 최대효율 및 평균효율은 두 개의 시스템이 모두 동작하여 각 각 95.6%와 93.84%의 효율특성을 얻었고, 입력전원 전압 550V_{DC}에서는 최대효율 및 평균효율은 Two Tank LLC공진컨버터만 동작 시켜서 각 각 97.45%와 96.62%의 높은 효율을 보였다. 이처럼 두 개의 시스템과 한 개의 시스템이 동작여부에 따라 효율특성이 변화 하는 것을 알 수 있다.



(c) 2단 구성 DC/DC 컨버터 효율특성
그림 6 입력전압과 부하변화에 따른 효율특성

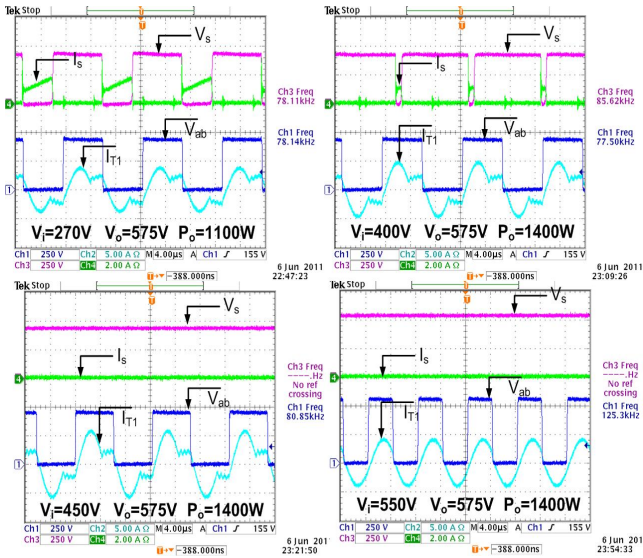
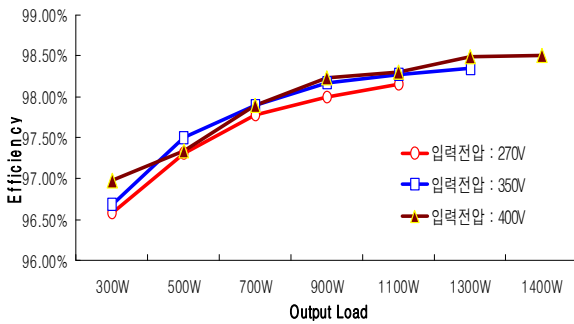
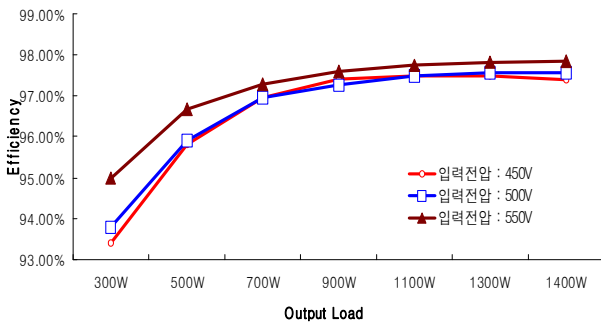


그림 5 입력전원 전압변화에 따른 각부 파형



(a) Inter Leaved Boost Converter 효율특성



(b) Two Tank LLC 공진컨버터 효율특성

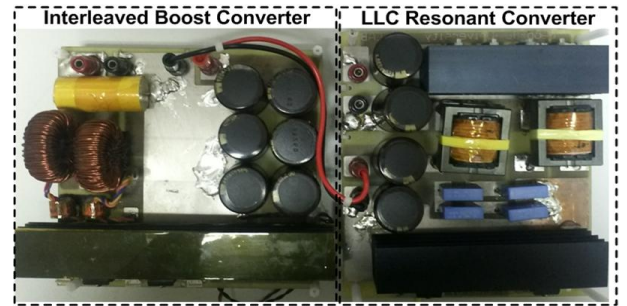


그림 7. 제작 실험한 시제품

4. 결론

본 논문에서 비절연형 컨버터와 절연형 컨버터를 이용하여 2 단으로 구성된 태양광발전용 DC/DC컨버터 주 회로를 적용 검토하였다. 높은 입력전압범위(430V_{DC} 550V_{DC})에서는 Two Tank LLC공진컨버터만 동작시켜 전체시스템 효율을 개선할 수 있었음을 보였다. 추후 Interleaved Boost Converter 주 스위칭소자(S₁, S₂)의 턴 온 스위칭손실을 줄이기 위한 CRM 모드 적용과 최적설계 등을 통해 좀 더 높은 효율을 얻기 위한 노력을 경주하고자 합니다.

이 논문은 카코뉴에너지(주) 산학협력연구과제로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] Christian P. Dick, Heinz van der Broeck, etc. "Design and Implementation of a Modular Interactive System as Teaching Project" PESC '06. 37th IEEE pp 1 7, 2006. 6
- [2] 오은태, 윤수영, 이윤재, 유광민, 채영준, 한병문, 이준영 "연료전지 계통 연계형 고효율 DC DC컨버터", 전기학회논문지, 제58권 제12호 2009.12, page(s): 2410 2415
- [3] 윤광호, 정봉근, 심치화, 품소피아, 김은수 "Symmetrical Voltage Doubler Rectifier(SVDR)가 적용된 LLC공진컨버터", 2010 전력전자 추계학술대회 논문집 pp.58 59
- [4] Soeren Baekhoej Kjaer, Member, IEEE, John K. Pedersen, Senior Member, IEEE, and Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE "A Review of Single Phase Grid Connected Inverters for Photovoltaic Modules" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 5, 2005, pp.1292 1306
- [5] L. Balogh, R. Redl, "Power factor correction with interleaved boost converters in continuous inductor current mode", in Proc. IEEE APEC'93, pp. 168 174, 1993.