

넓은 입력전압 제어범위를 갖는 DC-DC 컨버터

노영재, 메스사란, 장상호, 강철하, 김은수[†]
 전주대학교

DC-DC Converter with Wide Input Voltage Variable Ranges

Y.J Noh, Mease E.S, S.H Jang, C.H Kang, E.S Kim
 JeonJu University

1. 서 론

태양광 모듈, 연료전지 및 축전지와 같은 장치들은 직류전압을 출력하지만, 일반적으로 출력되는 전압변동 폭이 크게 나타난다. 따라서 안정적으로 일정한 레벨의 출력을 얻기 위해서 넓은 입력 전압 제어범위를 갖는 DC-DC 컨버터가 이용되고 있다. 일반적으로 일사량에 따라 전압변동 폭이 큰 태양광모듈 발전전압($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$)에서 일정 출력전압($400V_{DC}$)을 얻기 위해서 적용되고 있는 그림 1의 2단 구성 DC-DC 컨버터는 태양광모듈 전압변화에 따라 일정전압으로 승압시키기 위한 승압컨버터와 고정 시비율로 동작하는 LLC공진컨버터로 입력에서 출력까지 2단으로 구성되어 있다.^[1,2] LLC공진컨버터는 일정한 입력전압범위에서 영전압 스위칭을 통한 높은 효율을 얻을 수 있지만, 승압컨버터는 하드스위칭(Hard Switching)을 하기 때문에 전체효율($\eta_T = \eta_{boost} \times \eta_{resonant}$)을 저감시키는 원인이 된다. 뿐만 아니라, 모든 입력전압 및 부하 조건에서 승압컨버터는 정격부하로 설계되어 동작되기 때문에 전체적인 단가상승 및 효율을 저감시킬 수 있다.

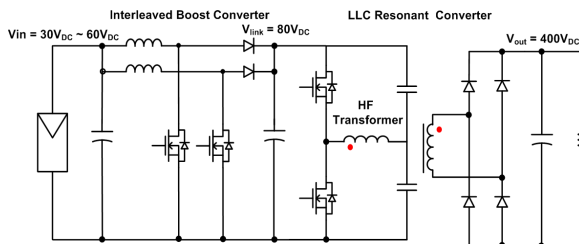


그림 1. 기존 2단 구성 DC-DC 컨버터

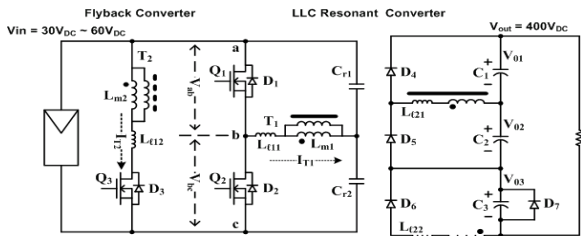
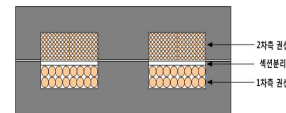


그림 2. 제안된 DC-DC 컨버터 주회로도

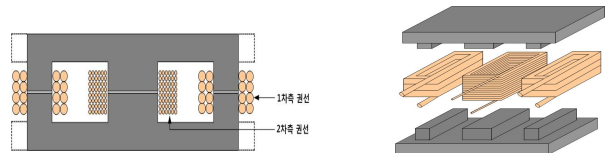
또한, LLC공진컨버터만으로 1단 구성 DC-DC 컨버터를 적용하여 일정출력전압($400V_{DC}$)을 제어할 수 있지만, 넓은 입력전압범

위($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$)에 대응하기 위해서는 작은 값의 자화인덕턴스(L_m)를 갖는 변압기를 적용해야 하며 큰 자화전류(I_m)로 인해 전체 효율을 감소시키는 요인이 된다.

그림 2의 제안된 DC-DC 컨버터는 기존 2단 구성 DC-DC 컨버터에서 효율을 개선하기위해 승압컨버터를 적용하지 않고, LLC공진컨버터와 플라이백 컨버터 적용을 통해 넓은 입력전압범위($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$)에서 동작 가능한 DC-DC 컨버터를 제안하였다.^[3] LLC 공진컨버터는 일반적으로 그림 3(a)처럼 하나의 변압기로 1차측 누설인덕턴스(L_{ll1})를 키우기 위해 1차측 권선과 2차측 권선을 분리하여 권선을 한다. 하지만 낮은 입력전압에서는 변압기 1차측 턴-수가 많지 않아서 그림 3(a)와 같이 1차측 누설인덕턴스(L_{ll1})를 키우기 위해 1차측 권선과 2차측 권선을 분리하여 권선한다 할지라도 공진에 필요한 누설인덕턴스 값을 얻기 힘들다. 본 논문에서는 평면변압기를 적용하여 1차측 누설인덕턴스(L_{ll1})를 증가시킬 수 있는 권선방법을 제안하였다. 그림 3(b)의 제안된 변압기의 형상과 권선방법은 큰 값의 1차측 누설인덕턴스(L_{ll1})를 얻기 위해 바깥쪽 자로에 각각 1차측 권선을 직렬로 연결하였고, 중간자로에 2차측 권선을 하여 바깥쪽 자로에서 생성된 자속에 의해 중간자로에 감긴 2차측 권선에 자속이 유지되고 1, 2차측 권선의 낮은 결합계수로 인해 1차측 누설인덕턴스(L_{ll1})를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 그림 3(b)의 제안된 평면변압기의 점선부분의 코어형상(코어의 양옆 및 앞, 뒤)은 바깥쪽 권선에서 생성된 자속이 외부로 누출되는 것을 최소화하여 EMI를 저감하고 누설인덕턴스를 증가시킬 수 있도록 제안 적용하였고, 변압기 턴-수비를 줄이기 위해 Voltage Doubler 정류회로를 적용하여 2차측 권선수를 1/2로 저감하고자 했다.



(a) 기존 평면변압기 권선방법



(b) 제안된 평면변압기 형상 및 권선방법

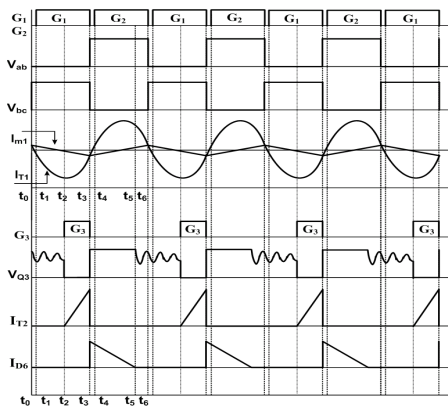
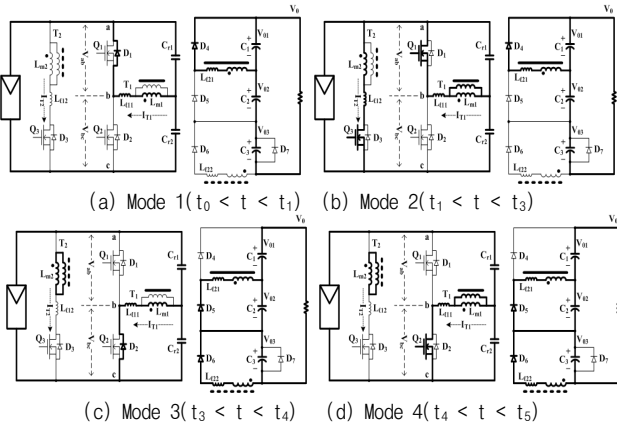
그림 3. 평면변압기 형상 및 권선 방법

2. 본 론

2.1 제안된 DC-DC 컨버터 동작

본 논문에서는 그림 2의 제안된 DC-DC 컨버터의 LLC 공진컨버터는 입력전압($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$) 범위 내에서 입력전압변화에 상관없이 주스위칭 소자 Q_1, Q_2 는 50% 고정 듀티와 일정 스위칭주파수(f_s)에서 동작한다. 때문에 주스위칭 소자(Q_1, Q_2)의 영 전압 스위칭(Zero Voltage Switching)은 단지 LLC 공진컨버터에 의해 일어나고, 플라이백 컨버터는 입력전압변동($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$)에 대응하여 스위칭소자 Q_3 의 듀티를 제어하여 일정출력전압($V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} = 400V_{DC}$)을 제어할 수 있다. LLC 공진컨버터가 입력전압($30V_{DC} \sim 60V_{DC}$)에 따라 최대부하에서 1/2 부하까지 감당하기 때문에 플라이백 컨버터는 최대 정격부하의 1/2 부하만 감당하면 된다. 따라서 소자정격 및 전류 스트레스를 저감 할 수 있는 장점이 있다.

2.1.1 제안된 DC-DC 컨버터 동작모드



(e) 입력전압($60V_{DC}$) 보다 낮은 입력전압에서 동작파형
 그림 4. 입력전압($60V_{DC}$) 보다 낮은 입력전압에서 동작모드 및 동작파형

제안된 DC-DC 컨버터에 입력전압이 $60V_{DC}$ 보다 낮아지는 경우 그림 4(e)와 같이 낮아진 전압만큼 출력전압을 보상하기위해 플라이백 컨버터 스위칭소자 Q_3 의 듀티 제어를 통해 LLC 공진컨버터의 변압기(T_1)와 플라이백 컨버터 변압기(T_2)의 정류된 전압에 의해 일정 출력전압($V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} = 400V_{DC}$)을 얻을 수 있게 하였다.

(a) **동작모드 1** ($t_0 < t < t_1$): t_0 시점에서 주스위칭소자 Q_2 가 턴-오프(Turn-off)되고, 변압기 T_1 의 1차측 자화인덕턴스(L_{m1})에 저장되었던 에너지는 주스위칭소자 Q_2 의 내부 커패시터를 입력전압만큼 충전시키는 동시에 주스위칭 소자 Q_1 의 내부 커패시터를 영 전압까지 방전 시키고, Q_1 의 내부다이오드(D_1)를 통해 부전류가 흐르게 된다. 이때 주스위칭 소자 Q_1 이 턴-온(Turn-on)하면 영 전압(ZVS)에서 턴-온(Turn-on) 된다.

(b) **동작모드 2** ($t_1 < t < t_3$): t_1 시점에서 주스위칭소자 Q_1 이 턴-온(Turn-on) 되어 LLC 공진컨버터는 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 등가누설인덕턴스의 공진에 의해 공진전류가 흐르고, t_2 시점에서 플라이백 컨버터의 스위칭소자 Q_3 가 턴-온(Turn-on)되어 변압기 T_2 의 1차측 자화인덕턴스(L_{m2})에 에너지를 저장하며 흐른다. LLC 공진컨버터는 2차측 다이오드 D_4 를 통해 출력커패시터(C_1)를 충전하며 부하로 흐르고, 플라이백 컨버터 변압기 T_2 의 2차측 권선은 역극성전압에 따라 출력다이오드 D_6 에 역바이어스 전압이 인가되어 2차측으로 전달하지 못한다.

(c) **동작모드 3** ($t_3 < t < t_4$): t_3 시점에서 주스위칭소자 Q_1 이 턴-오프(Turn-off)되고, 변압기 T_1 의 1차측 자화인덕턴스(L_{m1})에 저장되었던 에너지는 주스위칭소자 Q_1 의 내부 커패시터를 입력전압만큼 충전시키는 동시에 주스위칭소자 Q_2 의 내부 커패시터를 영 전압까지 방전 시키고, Q_2 의 내부다이오드(D_2)를 통해 부전류가 흐른다. 이때 주스위칭소자 Q_2 가 턴-온(Turn-on)하면 영 전압(ZVS)에서 턴-온(Turn-on)하게 된다. 또한 플라이백 컨버터의 스위칭소자 Q_3 가 턴-오프(Turn-off)되어 변압기 T_2 의 극성이 바뀌어 1차측 자화인덕턴스(L_{m2})에 저장된 에너지는 2차측 출력다이오드 D_6 를 통해 출력커패시터(C_3)를 충전하고 부하로 흐르게 된다.

(d) **동작모드 4** ($t_4 < t < t_6$): t_4 시점에서 주스위칭소자 Q_2 가 턴-온(Turn-on)되어 LLC 공진컨버터는 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 T_1 의 등가누설인덕턴스에 의해 공진이 일어나고, 플라이백 컨버터의 스위칭소자 Q_3 는 여전히 턴-오프(Turn-off) 상태로 있고, 모드 3의 동작을 진행하며 LLC 공진컨버터와 플라이백 컨버터는 일정 출력전압($V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} = 400V_{DC}$)을 부하에 전달한다.

또한 입력전압이 $60V_{DC}$ 이상 인가될 경우 플라이백 컨버터 스위칭 소자 Q_3 가 턴-오프 상태에 있으므로, 플라이백 컨버터는 동작하지 않고, LLC 공진컨버터는 최소스위칭 주파수로 셋팅되어 있던 스위칭 주파수가 증가되어 단지 LLC 공진컨버터의 동작으로 일정 출력전압($V_o = V_{o1} + V_{o2} = 400V_{DC}$)을 유지할 수 있다.

3. 실험 결과

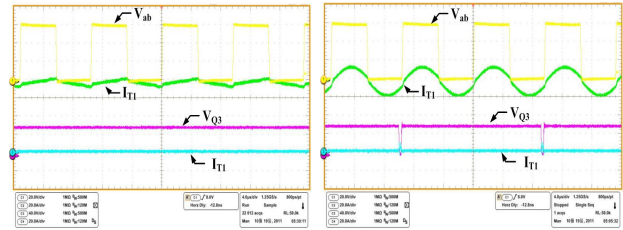
본 논문에서는 입력전압이 기준전압인 $60V_{DC}$ 보다 낮아지는 경우 일정한 출력전압($400V_{DC}$)을 얻기 위해 LLC 공진컨버터와 플라이백 컨버터가 동기 되어 동작하고, 높은 입력전압 ($60V_{DC}$ 이상전압)에서는 LLC 공진컨버터만 동작되도록 설계하였다. 최대정격출력용량 300W에 대해 각각 실험하였고, 실험에 적용된 LLC 공진컨버터 변압기 T_1 는 그림 2(b)의 제안된 변압기 권선방법을 적용하여 권선하였고 플라이백 컨버터 변압기 T_2 는 누설인덕턴스를 최소화하기위해 1차측 권선과 2차측 권선을 교차(Interleaved Winding Method)하여 권선하였다. 각각에 대한 변압기 파라미터는 표 1, 제안된 컨버터의 주요 정격은 표 2에 명시하였다.

표 1. 측정된 변압기 파라미터

	LLC 공진컨버터 변압기 T_1		플라이백 컨버터 변압기 T_2	
1차측누설인덕턴스	L_{l11}	1.33uH	L_{l12}	0.439uH
1차측으로 반영된 2차측누설인덕턴스	$N^2 L_{l21}$	1.19uH	$N^2 L_{l22}$	44.57nH
자화인덕턴스	L_{m1}	14.78uH	L_{m2}	5.99uH
등가누설인덕턴스	L_{eq1}	2.43uH	L_{eq2}	853nH
$N(N_1/N_2)$		0.308(8/26)		0.286(4/14)
적용 코아	PEE 3817S			

표 2. 제안된 컨버터 주요 성격

입력 전압(V_{in})	$30V_{DC} \sim 60V_{DC}$
출력전압 및 전류	$400V / 0.75A$
출력 용량(P_o)	300W
스위칭주파수(f_s)	104kHz
공진주파수(f_r)	104kHz
공진 커패시터(C_{r1}/C_{r2})	470nF / 470nF
LLC 공진 컨버터 스위칭 소자 (Q_1, Q_2)	IRFB3077PbF×2 (75V, 2.8mΩ, 210A)
Flyback 컨버터 스위칭 소자 (Q_3)	IRPF250N (200V, 75mΩ, 30A)
출력전류 다이오드(D_4, D_5) 출력전류 다이오드(D_6)	IRGB20B60PD1×2(600V, 40A) C2D10120(1200V, 10A)
제어 IC	L6599



(g) 입력 60V_{DC}, 출력용량 30W (h) 입력 60V_{DC}, 출력용량 300W
그림 5. 입력전압(30V_{DC}~60V_{DC}) 및 부하(30W~300W)에 따른 각부 파형 (Ch1:20V/div.,Ch2:20A/div.,Ch3:40V/div.,Ch4:20A/div.)

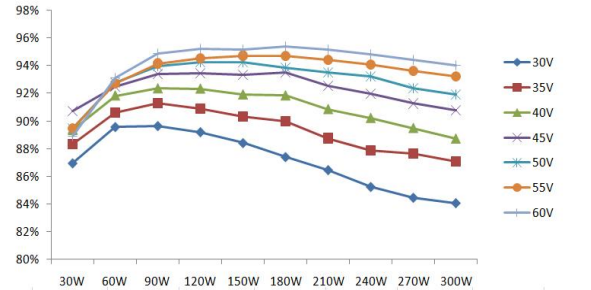


그림 6. 입력전압 변화 및 부하변화에 따른 효율

그림 5와 그림 6은 입력전압 변화(30V_{DC}~60V_{DC}) 및 부하변화 (30W, 300W)에 따른 실험 파형 및 효율특성이다. 전체 평균 효율은 91.46%이고, 입력전압 변화에 따른 각각의 평균효율은 입력전압 30V_{DC}에서 87.14%, 40V_{DC} 90.88%, 50V_{DC} 92.96%, 60V_{DC} 94.10%로 측정되었다. 코아사이즈 및 집적화를 위해 스위칭주파수를 100kHz 이상에서 동작하도록 설계, 적용하였기 때문에 플라이백컨버터의 스위칭손실이 증가되어 낮은 효율특성을 가졌지만, 플라이백컨버터의 스위칭주파수를 낮은 주파수로 가져간다면 낮은 입력전압 및 정격부하조건에서도 효율을 개선 할 수 있을 것으로 사료된다.

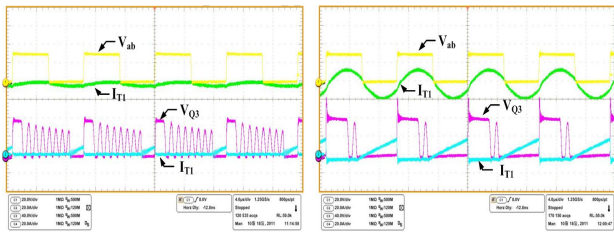
4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진컨버터와 플라이백을 적용하여 넓은 입력전압범위(30V_{DC}~60V_{DC})에서 동작할 수 있는 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 실험에 적용된 컨버터는 입력전압조건(30V_{DC}~60V_{DC}) 및 모든 부하조건(0.75A, 300W)에서 일정 출력전압(400V_{DC})을 제어하였다. LLC 공진컨버터와 플라이백 컨버터의 전압이득특성분석을 통해 시뮬레이션 결과와 실험결과가 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

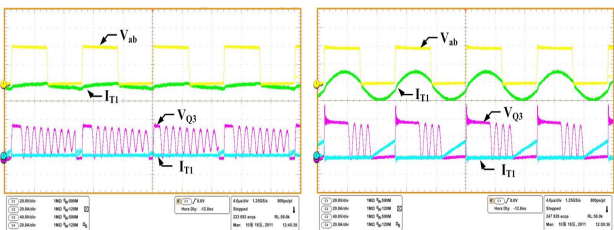
이 논문은 한국연구재단(KRF-2008-313-D00369) 지원으로 수행된 과제임

참고문헌

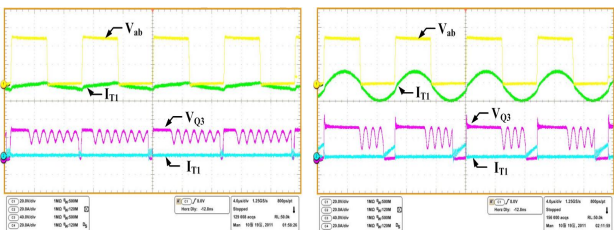
- [1] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules", IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1292-1306, 2005
- [2] 유호원, 정용민, 임승범, 이준영, 홍순찬 "1kW급 태양광 발전용 고정 시비율 방식의 DC-DC 컨버터". 전력전자학회 2008년도 학술대회 논문집, pp. 46-48, 2008.
- [3] 김은수, "넓은 입력전압 제어범위를 갖는 DC/DC 컨버터", 특허출원번호 '10-2011-0083016'



(a) 입력 30V_{DC}, 출력용량 30W (b) 입력 30V_{DC}, 출력용량 300W



(c) 입력 40V_{DC}, 출력용량 30W (d) 입력 40V_{DC}, 출력용량 300W



(e) 입력 50V_{DC}, 출력용량 30W (f) 입력 50V_{DC}, 출력용량 300W