

태양광 발전용 2단 구성 DC/DC 컨버터

尹光鎬*, 품소피약*, 金恩洙†, 元鍾涉**, 吳誠鎭***

Two Stage DC/DC Converter for Photovoltaic Generation

Kwang-Ho Yoon, Sopheak Phum, Eun-Soo Kim, Jong-Seob Won, and Sung-Jin Oh

요약

태양전지는 미래에너지를 위한 중요한 신재생에너지원이다. 본 논문에서는 태양광 발전 (PV PCS)를 위한 2단구
성 DC/DC컨버터와 동작제어를 제안한다. 넓은 입력전압 제어범위를 갖는 제안된 DC/DC컨버터는 1차 병렬 2차 직
렬로 연결된 Two Tank LLC공진컨버터와 Interleaved 승압 컨버터로 구성되어있고, 태양광모듈 전압범위에 따라
하나의 시스템 또는 두 개의 시스템으로 동작시켜 전체 평균효율을 증가시키는 방법을 제안한다. 제안된 컨버터에
대한 동작특성에 대해 분석, 서술되어 있으며, 2.2kW급 시제품 제작 및 실험을 통하여 적용 가능성을 보였다.

ABSTRACT

Solar cell is one of the most important new renewable energy for future energy generation. This paper
presents a novel two stage DC/DC converter topology for PV PCSs. The proposed converter consists of an
interleaved boost converter and a two-tank LLC resonant converter which is connected in parallel in primary
and series in secondary. The main idea of this topology is that the system can achieve either unilateral or
bilateral operations due to the input voltage level of the PV module, which leads to a better performance.
The operating schemes on the proposed converter are analyzed and described. A 2.2kW prototype product is
built, tested and verified.

Key Words : DC/DC converter; LLC resonant converter, Photovoltaic System (PV system); Power Conditioning
System (PCS)

1. 서론

최근 계속되는 원자재 가격 인상과 더불어 환경오
염 문제를 해결하고자 태양광 발전과 같은 신재생에너
지를 이용한 PCS(Power Conditioning System)를 위
한 DC/DC컨버터들의 발전으로 적용되는 제품들 간의

기능적인 면에서 평준화 되고 있는 추세이다. 태양광
일사량에 따라 태양광모듈전압($270V_{DC} \sim 575V_{DC}$)이 넓
은 범위로 가변하게 되는데, 일정한 출력전압 및
MPPT 제어를 하기 위해서는 전력변환장치를 사용하
야 한다. 태양광발전 PCS 전력변환장치들 중에 비 절
연형 승압컨버터만 구성하여 발전시스템을 적용하였을
경우에는 부품 수 감소와 고 효율특성을 얻을 수 있지
만 계통연계 시 전기적인 절연을 위해 50/60Hz 변압
기를 사용하여 PCS를 구성하기 때문에 중량 및 부피
가 증가되는 문제점을 가지게 된다.^[1] 절연형 DC/DC
컨버터만을 사용할 경우 고주파 변압기를 적용함으로
써 계통 연계 시 50/60Hz 큰 사이즈의 변압기가 사용
되지 않아 무게 및 부피가 작아지는 장점을 가지고 있

†교신저자 : 정희원, 전주대 전기전자정보통신공학부 부교수
E-mail : eskim@jj.ac.kr

*학생회원, 전주대 전기전자공학 석사과정

**정희원, 정희원, 전주대학교 기계자동차공학과 조교수

***정희원, 카코뉴에너지(주) 연구소장

접수일자 : 2011. 10. 11

1차 심사 : 2011. 10. 31

심사완료 : 2011. 11. 24

지만, 넓은 입력전압범위에서 대응하기 위해서는 작은 값의 자화인덕턴스를 갖는 변압기 적용에 의한 효율 감소 등의 단점을 갖는다. 최근 비절연형 승압컨버터와 함께 절연형 고주파 DC/DC 컨버터로 구성된 PCS를 위한 2단구성(Two Stage)의 DC/DC 컨버터가 사용되고 있다. 그림 1에서 나타내듯이 효율 개선 및 최적회로설계를 위해 비절연형 승압컨버터에서는 일정출력전압 또는 MPPT제어를 하고 LLC 공진컨버터는 듀티(Duty)와 스위칭주파수가 변동이 없는 고정 시비율로 동작하도록 하여 제어설계의 복잡성을 줄이고 회로가 갖는 스트레스를 분담할 수 있도록 구성된 2단 구성 방식 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 부품단가 상승과 전체적인 평균효율을 감소시키는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자, 그림 2에 나타내듯이 낮은 태양광모듈 전압범위($270V_{DC} \sim 430V_{DC}$)에서는 Interleaved 승압컨버터와 Two tank LLC 공진컨버터가 모두 동작하고, MPPT 전력제어를 위한 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 태양광모듈전압이 $430V_{DC}$ 이상에서 Interleaved 승압컨버터는 동작을 하지 않고 Two tank LLC 공진컨버터만 동작되기 때문에 넓은 입력전압 및 부하범위에서 전체적인 평균효율을 개선 할 수 있고, 1차측 입력단 승압컨버터에 적용된 스위칭소자들은 낮은 전압정격을 적용 할 수 있어 전체시스템 구성부품의 단가(cost)를 낮출 수 있는 방식을 제안하여 적용 실험하였다.

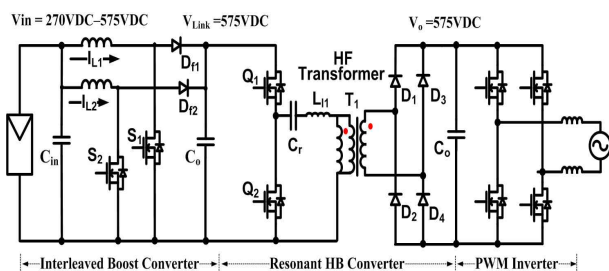


그림 1 기존 2단 구성 DC/DC컨버터 적용 태양광발전시스템
Fig. 1 Conventional two stage DC/DC Converter for Photovoltaic generation systems

2. 본 론

2.1 시스템의 구성

그림 2의 태양광발전시스템(PCS)은 Interleaved 승압컨버터와 Two Tank LLC 공진컨버터로 구성되어 있고, 적용된 Interleaved 승압컨버터는 효율개선을 위해 각각 병렬 연결되어 180도로 위상지연 스위칭제어 함으로써, 각 소자에 흐르는 전류를 절반으로 분담 할 수 있고, 입력전류와 출력전류의 리플을 저감 할 수 있는 회로이다. 또한 적용된 Two Tank LLC 공진컨버터는 두 개의 변압기(T_1, T_2)를 각각의 독립된 공진 탱크회로로 구성함으로써^[7] 주 스위칭 소자 Q_1 이 턴-오프 되고 Q_2 가 턴-온할 때 입력 측 전류는 공진커패시터 C_{r1}, C_{r3} 로 통하여 전류가 흐르면서 충전하는 공진회로가 동작되고. 공진커패시터 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, 공진 커패시터 C_{r1}, C_{r3} 를 통하여 방전하는 공진회로가 동작 된다. 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, 슬림화하는데 장점을 가지는 회로이다. 또한 공진커패시터가 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 Doubler회로를 적용하였다.^[3]

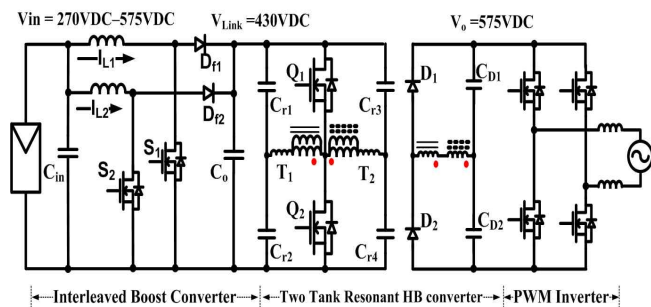


그림 2 제안된 2단 구성 DC/DC컨버터 적용 태양광발전시스템
Fig. 2 Proposed two stage DC/DC converter for photovoltaic generation systems

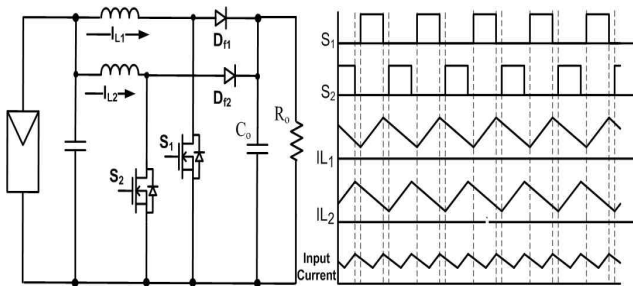


그림 3 Interleaved 승압컨버터 주회로 및 동작파형
 Fig. 3 Main circuit and operation waveforms of Interleaved Boost Converter

2.2 비 절연 승압컨버터 동작 및 효율특성

그림 3에서 나타낸 Interleaved 승압컨버터의 주회로 및 각 부 파형에서 볼 수 있듯이 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 출력 측 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.

적용된 Interleaved 승압컨버터의 인덕터(L_1, L_2) 설계시 가장 중요한 요소로 인덕턴스 계산과 코어의 선택이다. 먼저 인덕턴스의 계산은 전류 연속모드일 때 인덕터 최소전류 I_{min} 의 식을 기본으로 하여 인덕턴스의 계산식을 식 (1)에 나타내었다.

$$I_{min} = \frac{I_o}{1-D} - \frac{V_i}{2L} \cdot DT > 0 \quad (1)$$

$$L > \frac{V_{i-min} \cdot (1-D_{min}) \cdot D_{min} \cdot T}{2 \cdot I_{o-min}}$$

식 (1)을 통하여 계산된 인덕턴스는 1.23mH이다. 다음 중요한 절차는 적용된 코어의 선택인데, 코어의 선택 시 형상 및 재질을 고려해야 한다. 코어의 재질 및 투자율에 따라서 포화자속밀도, 전류자속밀도, 허용주파수, 코어의 온도, 손실이 달라지므로 적합한 형상 및 재질의 선택하는 것이 중요하다. 본 논문에서 선택한 코어는 낮은 코어 손실 특성을 가지고 있는 트로이달 형 분말코아로써 재질은 높은 포화자속밀도와 낮은 코어손실의 특징이 있는 High Flux재질이며 창성社의

표 1 측정된 인덕터 파라메타
 Table 1 Measured parameters in inductor

	인덕터 L_1	인덕터 L_2
인덕턴스(H)	1.23mH	1.23mH
코어의 재질	High Flux (트로이달 분말코아)	
적용된 코어	CH40060 (창성社)	
턴수(N)	123 Turn	

CH400060모델을 적용하였고, 적용된 코어의 지름은 4cm이며 단면적의 크기는 $1.072cm^2$ 이고, 여기서 인덕턴스계수(A_L)은 코어의 자로면적과 투자율에 따라 결정되며 재질과는 아무런 관계가 없다. 적용된 코어의 인덕턴스계수를 이용하여 턴수를 구할 수 있는데, 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$L = A_L \cdot N^2 \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

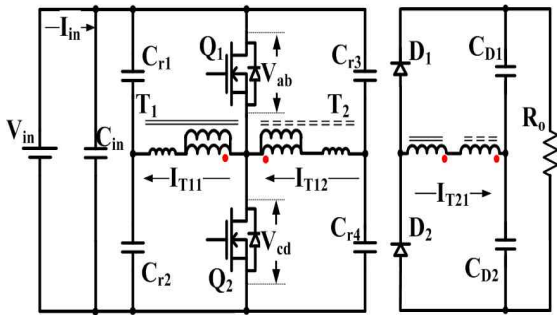
$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

식 (2)를 통하여 제작된 인덕터의 파라메타는 표 1에 나타내었다.

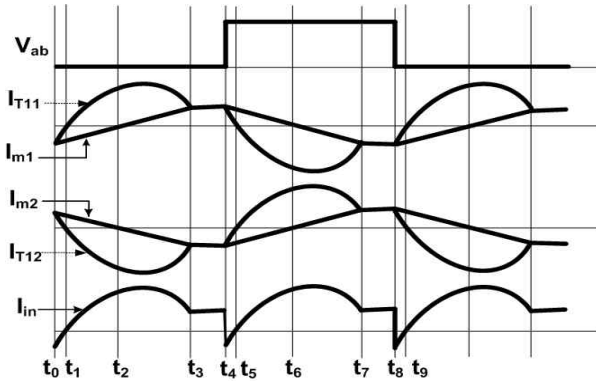
2.3 Two Tank LLC 공진컨버터

2.3.1 주 회로 구성

기존 단일변압기로 구성된 LLC 공진컨버터의 경우 주 스위칭소자(Q_1)가 턴-온 했을 때 입력전류(I_{in})가 흐르게 되고 주 스위칭소자 (Q_1)가 턴-오프 했을 때에는 입력 측 전류는 흐르지 않기 때문에 입력리플전류가 증가하게 되어 입력커패시터의 전류스트레스가 증가하게 되고 용량 및 부피가 커지는 단점을 가지고 있고, 1차측에 흐르는 전류가 증가하기 때문에 단일변압기로 변압기 설계 시 1차 측 권선의 두께가 두꺼워지고 권선의 손실 증가와 변압기 창면적의 제한이 많아 변압기의 크기 저감 및 최적설계 하는데 제약을 받게 된다. 이러한 기존 단일변압기를 적용한 LLC 공진컨버터에서의 단점을 보완하기 위하여 그림 4에서 나타낸 것처럼 Two Tank LLC 공진컨버터를 적용하였다. 적용된 컨버터는 슬림화를 위하여 두 개의 변압기를 각각의 독립된 공진탱크회로를 구성함으로써 주 스위칭소자(Q_1)이 턴 온/ 오프에 상관없이 모든 주기에 입력전류(I_{in})가 전달되어 입력최대전류 및 리플전류를 줄여 입력커패시터의 용량 및 부피를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있고, 변압기에 흐르는 실효전류를 절반으로 줄임으로써 권선에 발생하는 발열을 최소화 할 수



(a) Two Tank LLC공진컨버터 주회로
(a) Main circuit of two tank LLC resonant converter



(b) Two Tank LLC 공진컨버터 각부 파형
(b) Waveforms of two tank LLC resonant converter

그림 4 적용된 Two Tank LLC 공진컨버터 주회로 및 각부 파형
Fig. 4 Main circuit and waveforms of two tank LLC resonant converter

있어 집적화 및 고 전력밀도에 용이하다. 또한 각각 독립된 공진회로의 공진커패시터 전류 스트레스 및 용량을 줄이기 위하여 변압기와 대칭으로 연결 하였다.

2.3.2 적용된 Two Tank LLC 공진컨버터 동작 모드

Two tank LLC 공진컨버터는 두 개의 변압기(T_1 , T_2)와 공진커패시터 (C_{r1} , C_{r2} , C_{r3} , C_{r4})로 구성된 두 개의 독립된 공진회로로 가지고 있다. 주 스위칭 소자 (Q_1 , Q_2)가 턴-온 / 턴-오프 함에 따라 변압기(T_1)은 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})와 공진회로1을 만들고, 변압기 T_2 는 공진커패시터(C_{r3} , C_{r4})와 공진회로2를 구성하여 서로 독립된 공진탱크회로를 가진다. 불연속 모드에서 동작하는 제안된 컨버터는 4가지의 동작모드로 나눌 수 있고, 그림 5에 각 모드 별로 나타내었다.

(a) 동작모드1 ($t_0 - t_1$)

t_0 시점에서 주 스위칭소자 Q_2 가 턴-오프하게 되면 변압기 T_1 , T_2 의 자화인덕턴스 L_{m1} , L_{m2} 에 흐르는 자화전류 I_{m1} , I_{m2} 에 의해서 짧은 시간동안 주 스위칭소자 Q_2 의 출력커패시터는 입력전압(V_{in})으로 충전되고, 주 스위칭소자 Q_1 의 출력커패시터는 0전압으로 방전된 후 Q_1 의 역병렬 다이오드로 전류가 흐르기 시작하고 이와 동시에 변압기 T_1 , T_2 의 전압극성이 변하여 공진전류가 흐르기 시작한다. 이때 Q_1 의 역병렬 다이오드를 통해 전류가 흐르고 있을 때 주 스위칭소자 Q_1 이 턴-온하게 되면 주 스위칭소자 Q_1 는 영전압스위칭 (ZVS : Zero Voltage Switching)하게 된다.

(b) 동작모드 2 ($t_1 - t_3$)

모드2는 주 스위칭소자 Q_1 이 턴-온되어 공진모드 구간으로써 두 개의 독립된 공진전류 (I_{T11} , I_{T21})가 흐른다. 공진회로 중 하나는 주 스위칭소자 Q_1 가 턴-온 된 상태에서 공진커패시터 C_{r1} 과 변압기 T_1 의 누설인덕턴스 L_{l11} 와 자화인덕턴스 L_{m1} 를 통해 흐르는 방전전류와 공진커패시터 C_{r2} 와 변압기 T_1 의 누설인덕턴스 L_{l11} 와 자화인덕턴스 L_{m1} 을 통해 흐르는 충전전류로 구성된 공진전류(I_{T11})가 흐르게 되어 하나의 독립된 공진탱크 회로를 구성한다. 또 다른 공진회로 구성은 공진커패시터 C_{r3} 과 변압기 T_2 의 누설인덕턴스 L_{l21} 와 자화인덕턴스 L_{m2} 를 통해 흐르는 방전전류와 공진커패시터 C_{r4} 가 변압기 T_2 의 누설인덕턴스 L_{l21} 와 자화인덕턴스 L_{m2} 를 통해 흐르는 충전전류로 구성된 공진전류 I_{T21} 가 흐르게 되어 또 다른 독립된 공진탱크회로를 구성하며 동작하게 된다.

(c) 동작모드 3 ($t_3 - t_4$)

모드3은 모드2와 마찬가지로 주 스위칭소자 Q_1 가 턴-온 된 상태에서 이 시점에서는 부하측으로 흐르는 공진전류는 흐르지 않고 변압기 T_1 , T_2 의 자화인덕턴스 L_{m1} , L_{m2} 를 통해 흐르는 여자전류 I_{m1} , I_{m2} 만 흐르는 구간이다.

(d) 동작모드 4 ($t_4 - t_5$)

음의 반주기 시작의 모드 4에서는 모드 1에서처럼 Q_1 이 턴-오프 하게 되면 변압기 T_1 , T_2 의 자화인덕턴스 L_{m1} , L_{m2} 에 흐르는 자화전류 I_{m1} , I_{m2} 에 의하여 짧은 시간동안 주 스위칭소자 Q_1 의 출력커패시터에는 입력 전압으로 충전하게 되고, 주 스위칭소자 Q_2 의 출력커패시터는 0전압으로 방전된 후 주 스위칭소자 Q_2 의 역병렬다이오드를 통해 전류가 흐르고 있을 때 주 스위

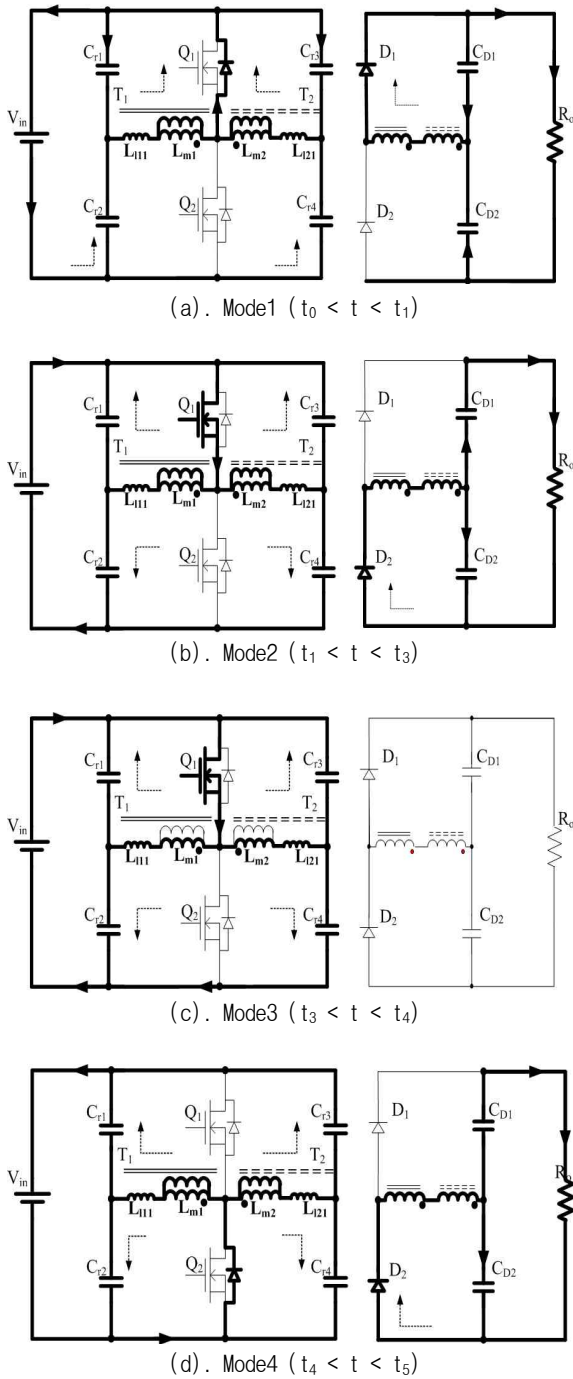


그림 5 동작모드
Fig. 5 Operation mode

칭소자 Q₂가 턴-온 되면 주스위칭소자 Q₂는 영전압 스위칭 (ZVS : Zero Voltage Switching)하게 된다.

이후 음의 반주기 동안 동작모드5(t₅-t₇), 동작모드 6(t₇-t₈)은 양의 반주기 동안의 동작모드2, 동작모드3과

같은 동작을 반복한다. 또한 제안된 LLC 공진컨버터의 공진주파수 fr보다 높은 주파수에서 동작되는 연속 모드일때는 동작모드 3과 동작모드6의 동작을 제외한 나머지 4가지의 동작모드로 동작하게 된다.

2.3.3 적용된 Two Tank LLC공진컨버터 전압 이득 특성분석 및 효율특성

Two Tank LLC 공진컨버터 주회로는 변압기(T₁)와 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})로 구성된 공진회로1과 변압기(T₂)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 이를 적용한 등가회로는 그림 6에 나타내었다. 그림 4에서 나타낸 두 개의 공진탱크가 동작하므로 각각의 탱크에 전압이득을 추출하여야 한다. 또한 두 개의 변압기(T₁, T₂)의 2차측의 커플링관계에 대한 임피던스 관계를 식 (3) ~ 식(8)으로 나타내었다. 여기서 L₁₂₁, L₁₂₂는 2차측 누설인덕턴스를 나타내었고, L₁₁₁, L₁₁₂는 1차측 누설인덕턴스를 나타내었다. 또한 C_{r1,2} C_{r3,4}은 직렬공진커패시터를 나타내었다.

여기서 C_{r1,2}=C_{r1}/C_{r2}, C_{r3,4}=C_{r3}/C_{r4}, C_{r1}=C_{r2}=C_{r3}=C_{r4}로 나타낼 수 있다.

$$Z_{S1} = N^2 j\omega L_{22} + N^2 j\omega L_{22} + j\omega L_{m2} / \left(\frac{1}{j\omega C_{r3,4}} + j\omega L_{112} \right) \quad (3)$$

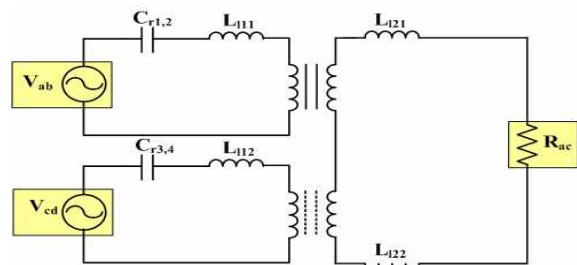
$$Z_{S2} = N^2 j\omega L_{22} + N^2 j\omega L_{21} + j\omega L_{m1} / \left(\frac{1}{j\omega C_{r1,2}} + j\omega L_{111} \right) \quad (4)$$

$$Z_{i n1} = \frac{1}{j\omega C_{r1,2}} + j\omega L_{111} + j\omega L_{m1} / (Z_{s1} + N^2 R_{ac1}) \quad (5)$$

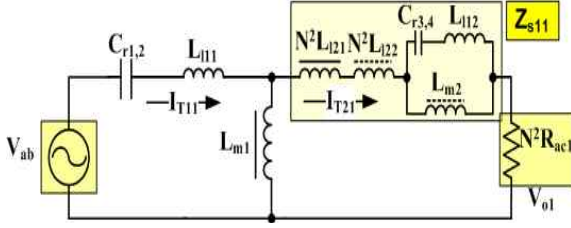
$$Z_{i n2} = \frac{1}{j\omega C_{r3,4}} + j\omega L_{112} + j\omega L_{m2} / (Z_{s2} + N^2 R_{ac2}) \quad (6)$$

$$Z_{S11} = N^2 j\omega L_{22} + j\omega L_{m2} / \left(\frac{1}{j\omega C_{r3,4}} + j\omega L_{112} \right) \quad (7)$$

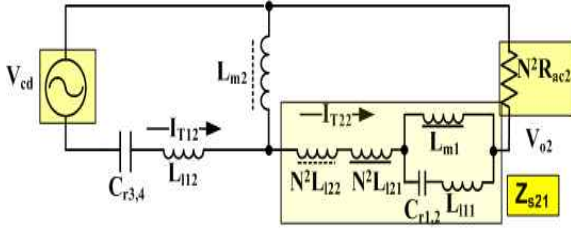
$$Z_{S21} = N^2 j\omega L_{21} + j\omega L_{m1} / \left(\frac{1}{j\omega C_{r1,2}} + j\omega L_{111} \right) \quad (8)$$



(a) 두 개의 전원을 갖는 등가회로도
(a) Equivalent circuit with two sources



(b) 전압원(V_{ab})에 대한 등가회로
(b) Equivalent circuit due to an independent source(V_{ab})



(c) 전압원(V_{cd})에 대한 등가회로
(c) Equivalent circuit due to an independent source(V_{cd})

그림 6 두 개의 공진탱크 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit with two resonant tanks

공진회로1의 변압기(T_1)의 1차측 누설인덕턴스 L_{l11} 과 자화인덕턴스 L_{m1} 의 비를 A_1 , 2차측 누설인덕턴스 L_{l21} 과 자화인덕턴스 L_{m1} 의 비를 B_1 으로 나타내었고, 공진회로 2의 변압기 (T_2)의 1차측 누설인덕턴스 L_{l21} 과 자화인덕턴스 L_{m2} 의 비를 A_2 , 2차측 누설인덕턴스 L_{l22} 와 자화인덕턴스 L_{m2} 의 비를 B_2 로 나타내었고, 이를 식 (9~12)으로 나타내었다.

$$A_1 = \frac{L_{l11}}{L_{m1}} \quad (9), \quad B_1 = \frac{N^2 L_{l21}}{L_{m1}} \quad (10)$$

$$A_2 = \frac{L_{l12}}{L_{m2}} \quad (11), \quad B_2 = \frac{N^2 L_{l22}}{L_{m2}} \quad (12)$$

그림 6의 등가회로에서 얻어진 입력전압 V_{ab} , 출력전압 V_{o1} 에 대한 전압이득특성식(G_1)을 식 (13)에 나타내었고, 입력전압 V_{cd} 와, 출력전압 V_{o2} 에 대한 전압이득특성식(G_2)을 식 (14)에 나타내었다. 따라서 두 개의 공진회로를 가지는 LLC 공진컨버터의 전압이득특성(G)은 식 (15)에서처럼 나타낼 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{\left(1 + A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_{r1,2}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac1}}\right) + j \frac{\omega L_{m1}}{N^2 R_{ac1}} \left[\left(1 + A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_{r1,2}}\right) (B_1 + 1) - 1\right]} \right| \quad (13)$$

$$G_2 = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{\left(1 + A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r3,4}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac2}}\right) + j \frac{\omega L_{m2}}{N^2 R_{ac2}} \left[\left(1 + A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r3,4}}\right) (B_2 + 1) - 1\right]} \right| \quad (14)$$

$$G = G_1 + G_2 \quad (15)$$

여기서 L_{m1} , L_{m2} 는 변압기(T_1 , T_2)의 자화 인덕턴스를 나타 내었고, R_{ac1} , R_{ac2} 는 LLC 공진컨버터의 등가 부하 AC저항을 나타내었다. 본 논문에서 설계된 변압기를 직접 제작하여 측정된 파라메타를 표 2에 나타내었고, 설계된 변압기를 제작, 측정된 파라메타를 적용하여 부하($N^2 R_{ac}$)변화에 따른 전압이득특성 $G(V_o/V_{in})$ 을 알아보기 위하여 Math-CAD시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다. 부하가 단락($N^2 R_{ac1}=N^2 R_{ac2}=0$)일 때의 주파수를 기준으로 규준화주파수를 $fn(fs/fr)$ 으로 나타내었다. 이때 공진주파수는 126.5kHz이다. 그림 9(b)에서 나타낸 것처럼 Two Tank LLC 공진컨버터의 효율특성에서는 입력전압범위(270V_{DC}-575V_{DC})에서는 Interleaved 승압컨버터가 출력전압을 430V_{DC}로 제어하기 때문에 입력전원 전압이 450V_{DC} 일 때 최대 정격부하인 2.2kW에서 97%, 최대효율은 1.5kW에서 97.5%, 평균효율은 96.81%의 높은 효율을 보였고, 입력전압 575V_{DC} 일 때 최대정격부하인 2.2kW에서 98.2%, 최대효율은 1.9kW에서 98.42%, 평균효율은 97.8%의 높은 효율을 보였다. Two Tank LLC공진컨버터에 적용된 스위칭소자의 $R_{ds}(0.07\Omega)$ 저항이 작아 불연속 구간 동작 중 순환전류가 흐른다 할지라도 전체적인 도통손실에 큰 영향을 주지 않은 것을 볼 수 있다.

표 2 측정된 변압기 파라메타

Table 2 Measured parameters in T_1 , and T_2

	변압기 T_1		변압기 T_2	
1차측누설인덕턴스	L_{l11}	38.1uH	L_{l12}	39uH
2차측누설인덕턴스	L_{l21}	30.6uH	L_{l22}	30uH
자화인덕턴스	L_{m1}	316.9uH	L_{m2}	319uH
등가누설인덕턴스	L_{eq1}	66.7uH	L_{eq2}	65uH
$N(n_1/n_2)$	2.18 (24/11)			
직렬공진커패시터(C_{r1} , C_{r2} , C_{r3} , C_{r4})	12nF			
적용코아	코아: EER4950 (PM7)			

3. 실험결과

본 논문에서는 2.2kW 정격출력용량을 가지는 Interleaved 승압 컨버터와 Two Tank LLC 공진컨버터로 구성된 Two Stage DC/DC 컨버터를 제작하였

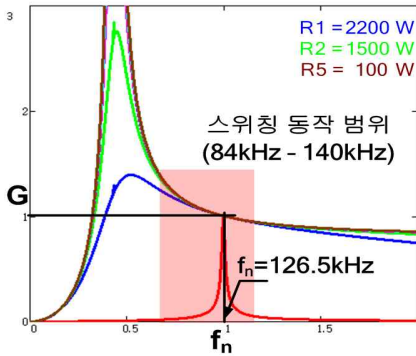


그림 7 부하변화에 따른 전압이득 특성
Fig. 7 Voltage gain characteristics due to the load variations

표 3 2단 구성 태양광 발전 DC/DC 컨버터 주요 정격
Table 3 Specifications of two stage DC/DC converter for photovoltaic generation

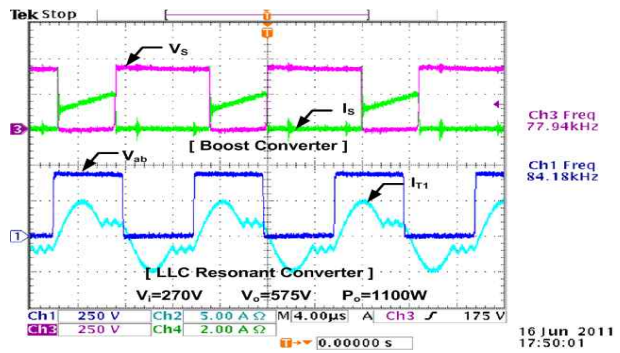
Interleaved 승압 컨버터	입력전압(V_{in})	$270V_{DC}$ - $575V_{DC}$
	출력전압(V_o)	$430V_{DC}$
	스위칭소자(S_1, S_2)	SPW 47N60 650V, 47A
	환류다이오드(D_{f1} ~ D_{f2})	IDH10S60C, 600V, 10A
	적용된 제어 IC	UC28220
Two Tank LLC 공진컨버터	입력전압(V_{in})	$430V_{DC}$ - $575V_{DC}$
	출력전압(V_o)	$575V_{DC}$
	출력용량(P_o)	2200W
	공진주파수(f_r)	126.5kHz
	스위칭소자(Q_1, Q_2)	SPW 47N60, 650V, 47A
	출력 정류다이오드 (D_1 ~ D_4)	IDH10S60C, 600V, 10A
	적용된 제어IC	MC34067

고, 적용 실험하였다. 입력전압 $270V_{DC}$, $400V_{DC}$, $450V_{DC}$, $575V_{DC}$ 의 4가지의 실험조건으로 실험 및 효율 측정 하였으며, Two Tank LLC 공진컨버터의 출력전압은 $575V_{DC}$, 출력용량 $2.2kW(575V_{DC}/3.7A)$ 에 대하여 실험하였다. 적용된 2단 구성 태양광 발전 DC/DC 컨버터의 실험조건과 주요 정격에 대하여 표 3에 나타내었다.

실험결과 그림 8에서 보듯이 Two Tank LLC공진컨버터의 단자전류 (I_{T1})는 단자전압 (V_{ab})에 대하여 항상 지상전류가 흐르고 있기 때문에 주 스위칭소자(Q_1, Q_2)는 모든 부하범위에서 항상 영전압스위칭(ZVS) 동작됨을 확인할 수 있다. 또한 효율측정 결과 Interleaved 승압컨버터의 출력전압을 $430V_{DC}$ 로 제어 하므로 입력 전원 전압이 $430V_{DC}$ 이상 일 때는 Interleaved 승압컨버터는 동작을 멈추고 Two Tank LLC공진컨버터만 동작하여 전체적인 평균효율을 개선할 수 있었다.

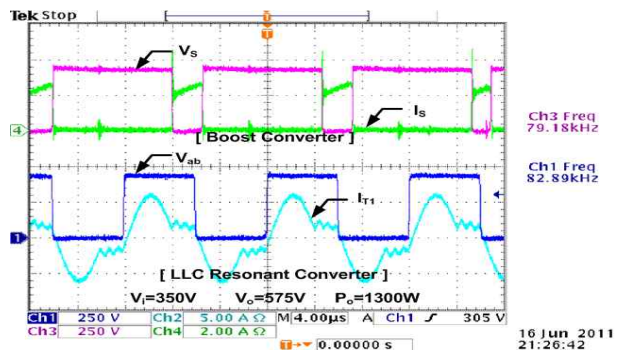
이와 같이 동작되는 Interleaved 승압컨버터는 넓은 입력전압($270V_{DC}$ - $575V_{DC}$)에서 일정한 출력전압 ($430V_{DC}$)을 제어하기 위하여 PWM제어IC(UCC28220)를 적용하였고, 그림 9(a)에 나타난 효율측정 실험결과처럼 입력전압 $270V_{DC}$ 일 때 최대효율은 $1.1kW$ 에서 97.91% , 평균효율은 97.22% 의 효율특성을 보였고, 입력전압 $400V_{DC}$ 일 때 최대효율은 $1.7kW$ 에서 98.5% , 평균효율은 97.8% 의 높은 효율을 보였다.

실험실 전원장치 조건상 입력전압 $270V_{DC}$ 에서는 $1.1kW$ 의 용량으로 실험하였고, 입력전압 $400V_{DC}$ 에서는 $1.7kW$ 의 용량으로 실험하였다. 또한 높은 입력전압범위 ($430V_{DC}$ - $575V_{DC}$)에서는 출력전압 $430V_{DC}$ 을 제어하고 있기 때문에 Interleaved 승압 컨버터가 동작을 하지 않고 다이오드(D_{f1}, D_{f2})를 통해서 도통 함으로써, 평균효율 99.4% 의 높은 효율특성을 보였을 뿐만 아니라 낮은 전압정격의 스위칭소자 및 다이오드를 사용할 수 있어 전압스트레스 및 단가를 저감할 수 있는 장점이 있다.



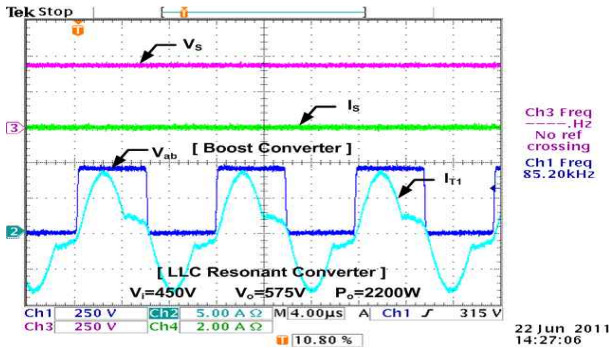
(a) 입력전압 $270V_{DC}$, 출력전압 $575V_{DC}$, 출력용량 $1.1kW$ 일 때 실험파형

(a) Experimental waveforms of the terminal voltage and current ($V_{in}=270V_{DC}$, $V_o=575V_{DC}$, $P_o=1100W$)



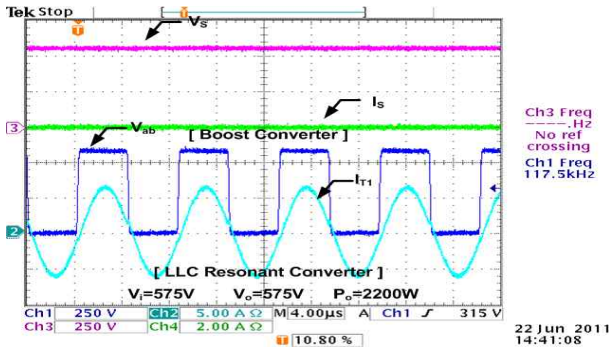
(b) 입력전압 $350V_{DC}$, 출력전압 $575V_{DC}$, 출력용량 $1300W$ 일 때 실험파형

(b) Experimental waveforms of the terminal voltage and current ($V_{in}=350V_{DC}$, $V_o=575V_{DC}$, $P_o=1300W$)



(c) 입력전압 450V_{DC}, 출력전압 575V_{DC}, 출력용량 2200W일 때 실험파형

(c) Experimental waveforms of the terminal voltage and current ($V_{in}=450V_{DC}$, $V_o=575V_{DC}$, $P_o=2200W$)



(d) 입력전압 575V_{DC}, 출력전압 575V_{DC}, 출력용량 2200W일 때 실험파형

(d) Experimental waveforms of the terminal voltage and current ($V_{in}=575V_{DC}$, $V_o=575V_{DC}$, $P_o=2200W$)

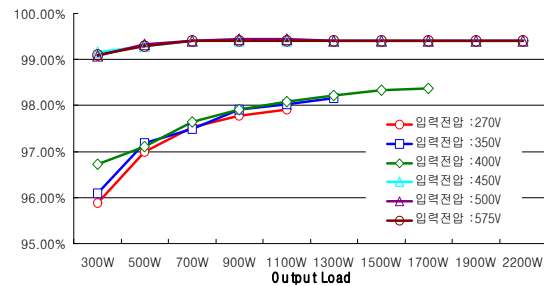
그림 8. 입력전원 전압변화에 따른 각부 파형

Fig. 8 Experimental waveforms of the terminal voltage and current in the input voltage

그림 9(c)에서처럼 입력전원전압이 270V_{DC} 일 때 두 개의 컨버터가 모두 동작하여 최대효율은 1.1kW에서 95.6%, 평균효율은 93.84%의 효율특성을 얻었고, 입력전원전압 575V_{DC} 일 때 Interleaved 승압컨버터는 동작을 멈추고, Two Tank LLC 공진컨버터만 동작시켜서 최대정격부하인 2.2kW에서 97.7%, 최대효율은 1.9W에서 97.9%, 평균효율은 96.62%의 높은 효율특성을 보였다.

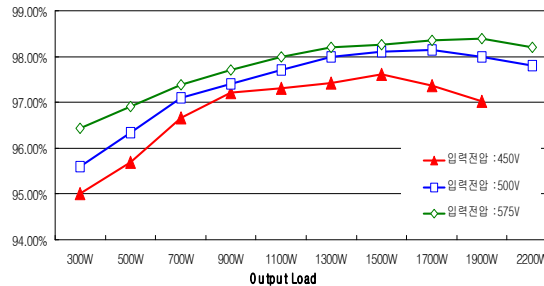
앞서 서술한 동작제어특성을 갖는 Two stage DC/DC 컨버터 효율특성과 기존 동작제어방식을 갖는 Two stage DC/DC 컨버터 효율특성과 비교하기 위하여 그림 2의 동일회로에 대하여 Interleaved 승압컨버터는 넓은 입력전압(270V_{DC}~575V_{DC}) 범위에서 575V_{DC}

로 일정출력전압 및 전력제어를 하고 Two Tank LLC 공진컨버터는 일정 575V_{DC} 입력전압조건에서 출력전압 575V_{DC}로 동작제어 되었을 때의 기존 제어방식과 제안된 제어방식에 대한 주회로 효율특성을 비교하면, 두 개의 컨버터 동작 시와 하나의 컨버터 동작 시의 여부에 따라 제안된 제어방식이 1~2%정도 효율특성이 개선됨을 별도의 실험을 통해 알 수 있었다.



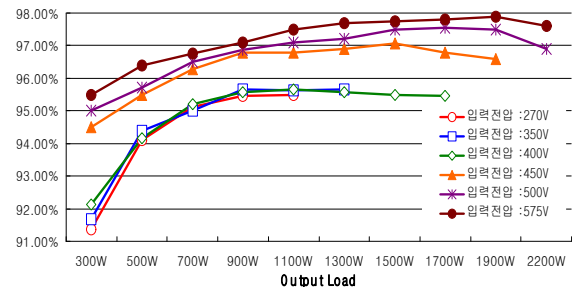
(a) Interleaved 승압 컨버터 효율특성

(a) Efficiency characteristics in the interleaved boost converter



(b) Two Tank LLC 공진컨버터 효율특성

(b) Efficiency characteristics in the two tank LLC resonant converter



(c) 제안된 동작제어특성을 갖는 2단 구성 DC/DC 컨버터 효율특성

(c) Efficiency characteristics in two stage DC/DC converter with the proposed operation control characteristics

그림 9 입력전압과 부하변화에 따른 효율특성

Fig. 9 Efficiency characteristics for each input voltage and load condition



그림 10 2.2kW급 2단구성방식 DC/DC 컨버터
 Fig .10 Prototype of 2.2kW two stage DC/DC converter

4. 결 론

본 논문에서 비절연형 컨버터와 절연형 컨버터를 이용하여 2단으로 구성된 태양광발전용 DC/DC컨버터 주 회로 및 동작특성에 대해 검토하였다. 높은 입력전압범위(430VDC-575VDC)에서는 Two Tank LLC공진 컨버터만 동작시켜 전체시스템 효율을 개선시킬 수 있음을 보였다.

이 논문은 카코뉴에너지(주)의 연구비 지원에 의하여 연구 되었음

참 고 문 헌

[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, 이운재, 유광민, 채영준, 한병문, 이준영 "연료전지 계통 연계형 고효율 DC-DC컨버터", 전기학회 논문지, 제58권 제12호 2009.12, pp. 2410-2415

[3] 윤광호, 정봉근, 심치화, 품소피약, 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.

[6] Lohner, A. Meyer, T. Nagel, A. ' A new panel-integratable inverter concept for grid-connected

photovoltaic systems', Industrial Electronics, 1996. ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on

[7] 김주훈, 강성인, 김은수, 허동영, 정용채, "두개의 변압기와 공진 탱크로 구성된 LLC 공진 컨버터", *전력전자학회 논문지*, 제14권 제5호, pp. 406-414, 2008. 10.

저 자 소 개



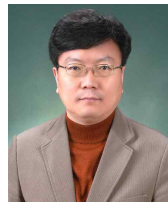
윤광호(尹光鎬)

1983년 4월 28일생. 2010년 2월 전주대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



품소피약(Sopheap Phum)

1985년 2월 4일생. 2011년 2월 전주대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정



김은수(金恩洙)

1964년 3월 26일생. 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989년~2001년 한국전기연구원 전력전자연구그룹 선임연구원. 2001년 9월~현재 전주대 공과대학 전기전자정보통신공학부 부교수. 당 학회 총무이사.



원종섭(元鍾涉)

1966년 1월 3일생. 1988년 부산대 공과대학 정밀기계공학과 졸업. 1998년 및 2003년 Texas A&M University 기계공학과 졸업(석사, 공박). 1993년~1996년 국방과학연구소 연구원. 2005년~2008년 현대자동차 기술연구소 선임연구원. 2008년 9월~현재 전주대 공과대학 기계자동차공학과 조교수.



오성진(吳誠鎭)

1968년 7월 17일생. 1986년 경희대 문리과대학 수학과 졸업. 1990년 포항공대 대학원 수학과 졸업(석사). 현재 한양대 공과대학 자동차공학과 박사과정. 1992년~1995년 포스콘 연구원. 1995년~1998년 현대정보기술 선임연구원. 1998년~1999년 현대엘리베이터 선임연구원. 1999년~2007년 이화전기 수석연구원. 2009년~현재 카코 뉴에너지 연구소장.