

태양광 발전을 위한 고효율 승압형 전력 변환장치

박 경원, 김 영철, 김 준흥, 서 기영, 고 희석, 이 현우
경남대학교 전기공학과

The High efficiency Buck Power Conversion System for Photovoltaic Power Generator

K.W. Park, Y.C. Kim, J.H. Kim, K.Y. Su, H.S. Koh, H.W. Lee
Dept. of Electrical Engineering, KyungNam University.

Abstract- Power conversion system must be increased switching frequency in order to achieve a small size, a light weight and a low noise. However, the switches of converter are subjected to high switching power losses and switching stresses. As a result of those, the power system brings on a low efficiency. In this paper, the authors propose a DC-DC boost converter of high power by partial resonant switch method (PRSM). The switching devices in a proposed circuit are operated with soft switching and the control technique of those is simplified for switch to drive in constant duty cycle. The partial resonant circuit makes use of an inductor using step up and a condenser of loss-less snubber. Also the circuit has a merit which is taken to increase of efficiency, as it makes to a regeneration at input source of accumulated energy in snubber condenser without loss of snubber in conventional circuit. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of system is high. The proposed converter is deemed the most suitable for high power applications where the power switching devices are used.

1. 서 론

태양전지의 출력특성은 주변의 온도와 일사량의 변화에 의해 최대전력점이 변화된다. 따라서 최대의 전력을 얻기 위해서는 태양전지의 출력 전압, 전류를 항상 감시할 필요가 있다. 태양전지의 출력특성은 부하상태, 일사량, 판넬면의 온도 등에 따라 크게 변화하므로 최대전력을 발전하는 최대동작점이 존재한다. 태양전지의 단락전류는 일사량의 변화에 거의 비례하여 증감하

지만, 개방전압은 온도가 1°C 상승하면 약 0.5% 내려간다. 계절의 변화에 따른 일사량 및 주위온도에 따라 태양전지 출력은 시시각각 변화하며 부하상태 또한 변화하므로 태양전지 특성이 변화하지 않더라도 동작점이 변화하는 특성이 있다.

따라서 본 논문에서는 태양전지의 최대출력 및 전력 변환기의 출력량을 동시에 검출하여 광범위한 부하변화에 대응할 수 있는 승강압 회로를 이용하여 최대전력을 부하측에 전달할 수 있는 시스템을 구성한다. [1][2]

먼저 태양전지의 최대출력점을 추적하기 위해 최대점 근방의 2점을 도출하여 최대전력점 및 2점에 대한 포물선법에 의한 최대전력을 구하는 방식을 채택했다.

기존의 전력변환기들은 하드 스위칭 동작에 의한 스위칭 손실을 보호하기 위해서 스위치 주변에 스너버회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증대할 경우 스너버 손실이 크게 되어 효율은 감소하게 된다.

이런 문제를 개선하기 위해 "부분공진기법 [PRSM : Partial Resonant Switch Method][3][4]를 변환기에 적용함으로써 스위치들은 소프트 스위칭으로 되어 스위칭 손실이 저감되어 제한한 전력변환기는 고효율로 동작한다. 또한 부분공진 회로부의 공진 소자는 스너버 콘덴서를 이용한 것으로서 콘덴서에 축적된 에너지는 전원 측으로 회생되어 스너버 손실이 없으며, 회생된 에너지에 의하여 제한하는 컨버터 회로는 같은 용량급의 기존의 컨버터 보다 사용된 스위치의 시비율이 줄어드는 잇점이 있다.

2. PRSM 승압 DC-DC 컨버터

2.1 기본원리

소프트 스위칭 승압 DC-DC 컨버터를 그림 2에 나타낸다. 부분공진 회로부는 스위칭 소자 S1, S2와 승압용 리액터 Lr 및 로스리스 스너버 콘덴서 Cr로 구성되어

있으며, 스위치 턴-온시 리액터 L_r 의 전류는 제로가 되어 ZCS로 되며, 턴-오프시는 콘덴서 C_r 의 전압이 제로에서 동작되므로 스위치는 ZVS로 동작한다. 그리고 스위치 S_1 과 S_2 는 듀티율 일정으로 같은 주파수로 스위칭 하기 때문에 제어회로가 매우 간단하며 리액터전류가 두회로로 분류되어 같은 용량일 때의 하드 스위칭보다 배로 전류용량을 증가시킬 수 있다. 또한 스너버 콘덴서는 스위치들의 턴-온에 의해 부분공진 회로가 형성되어 축적된 에너지를 입력 전원측으로 회생되어 스너버 손실이 전혀 없으며, 충분히 큰 스너버 콘덴서를 사용해도 변환기의 효율은 저하하지 않는다. 제안한 컨버터는 스너버 콘덴서의 용량을 증가시킴에 의해 방전회생되는 전하량이 크게되어 기존의 승압형 컨버터에 비해서 출력전압이 더욱 상승되므로 동일 출력전압 하에 스위치의 듀티율을 다소 감소시킬 수 있어 컨버터의 효율이 더욱 증가되는 잇점이 주어진다.

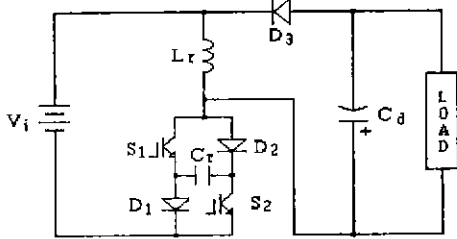


그림 1. 소프트 스위칭 승압형 DC-DC 컨버터

2.2 동작원리

출력측 부하 인덕턴스가 공진용 인덕턴스에 비해 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기에 대해서 부하를 정전류원으로 볼 수 있으며, 초기조건으로 S_1, S_2 는 오프, C_r 에는 입력전압 V_i 와 평활용 콘덴서 전압 V_{cd} 의 합으로 충전되었다고 가정한다. 제안한 소프트 스위칭 승압형 컨버터를 스위칭 1주기에 대해 모드별로 나누어 보면 그림 3과 같다.

< 모드 1 ; $T_1, t_0 < t \leq t_1$ >

이 모드는 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 온하는 기간으로서 턴-온 직전의 인덕터 L_r 의 전류는 제로이므로 S_1, S_2 는 ZCS 동작을 한다. 그리고 전원 전압 V_a 와 출력 전압 V_{cd} 와의 합이 L_r 에 인가되어 L_r 와 C_r 는 공진하고 C_r 가 방전한다. 이때 공진 리액터의 저항을 제로로 가정하면, 스너버 콘덴서의 전압 v_{cr} 는 식 (1)과 같이 방전하고, 리액터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (2)와 같이 증가한다. $V_{cr}=0$ 으로 완전방전이 될때 이 모드는 끝나며, 이 모드의 기간을 식 (3)으로 주어지고 이 시점에서의 리액터 전류는 식 (4)로 된다.

$$v_{cr} = (2V_i + V_{cd}) \cos \omega t - V_i \quad (1)$$

$$i_{Lr} = \frac{2V_i + V_{cd}}{X} \sin \omega t \quad (2)$$

$$T_1 = \sqrt{L_r C_r} \cos^{-1} \left(\frac{V_i}{2V_i + V_{cd}} \right) \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{1}{X} \sqrt{(2V_i + V_{cd})^2 - V_i^2} \quad (4)$$

여기서

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad X = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

< 모드 2 ; $T_2, t_1 < t \leq t_2$ >

모드 2는 $V_{cr}=0$ 로 되면 L_r 의 전류는 S_1-D_1, D_2-S_2 의 두 회로로 분류한다. 이 기간중에 인덕터 L_r 는 에너지를 축적한다. 이 때의 리액터 전류는 식 (5)와 같이 직선적으로 증가한다.

$$i_{Lr} = \frac{V_i}{L_r} t + I_1 \quad (5)$$

$$T_2 = T_{on} - T_1 \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{V_i}{L_r} T_2 + I_1 \quad (7)$$

식 (6)의 T_2 는 모드 2의 기간이며, 이 모드가 끝나는 시점에서의 리액터 전류는 I_2 는 식 (7)과 같다.

< 모드 3 ; $T_3, t_2 < t \leq t_3$ >

이 모드는 S_1, S_2 를 오프하는 모드로서 리액터 L_r 의 전류는 $D_1-C_r-D_2$ 를 통하여 흐르고 L_r 과 C_r 는 공진하며, 콘덴서 C_r 를 충전시킨다. 이때 스위치들은 ZVS 동작을 하고 이 모드에서의 스너버 콘덴서 전압은 식 (8)과 같으며, 리액터에 흐르는 전류는 식 (9)와 같다.

$$v_{cr} = V_i + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_2 \cos(\omega t + \theta) \quad (8)$$

$$i_{Lr} = I_2 \sin(\omega t + \theta) \quad (9)$$

콘덴서의 전압이 V_{cd} 로 될 때 이 모드는 끝나고, 이 모드의 기간 T_3 는 식 (10)이며, 이 모드가 끝나는 시점에서의 리액터 전류 I_3 는 식 (11)과 같다.

$$T_3 = \sqrt{L_r C_r} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{V_{cd}}{\sqrt{V_i^2 + \frac{L_r}{C_r} I_2^2}} - \theta \right) \right\} \quad (10)$$

$$I_3 = I_2 \cos \omega T_3 + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} V_i \sin \omega T_3 \quad (11)$$

여기서

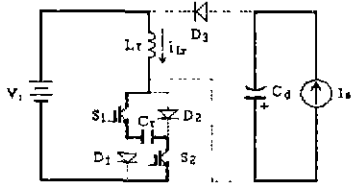
$$I_2 = \sqrt{\frac{C_r}{L_r} V_i^2 - I_1^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{L_r}{C_r} \frac{I_1}{V_i} \right)$$

< 모드 4 ; $T_4, t_3 < t \leq t_4$ >

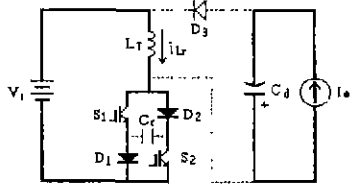
모드 4는 리액터 L_r 에 흐르고 있는 전류가 부하 측으로 유입되고 직선적으로 감소한다. 이 모드는 $i_{Lr}=0$ 가 되면 끝난다. 이 모드에서 전류 i_{Lr} 는 식 (12)과 같으며, 이 모드의 기간 T_4 는 식 (13)과 같다.

$$i_{Lr} = I_3 - \frac{V_{ad}}{L_r} t \quad (12)$$

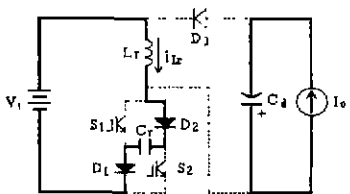
$$T_4 = \frac{L_r}{V_{ad}} I_3 \quad (13)$$



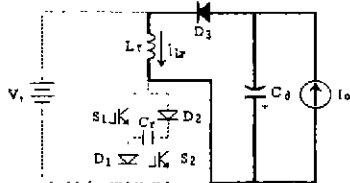
(Mode 1)



(Mode 2)



(Mode 3)



(Mode 4)

그림 2. 회로 동작모드

3. 태양광발전 시스템

에너지의 고갈과 환경성 문제로 장래의 전력공급원의 보조로서 태양광 발전이 주목되고 있다. 그러나

나 지표에 직사되는 에너지 온도는 최대에서도 $1[\text{kw}/\text{m}^2]$ 정도 밖에 되지 않으며 또한 태양전지의 에너지를 전기에너지로의 변환 효율은 수십%. 밖에 되지 않으므로 가능한 한 많은 전력을 빼내기 위하여 태양전지의 동작점을 항상 최대전력점에서 동작되도록 제어할 필요가 있다. 또한 개인 주택용 태양광발전 시스템에 있어서는 전용의 설치 장소의 확보가 용이하지 않고, 따라서 그것은 가능한 한 소형화할 것이 요망된다.

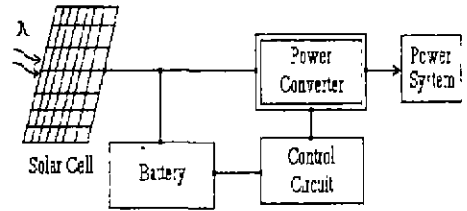


그림 3. 태양광 발전 시스템 구성도

태양전지의 출력 전압, 전류만을 계속하여 최대출력 제어를 하는 2차 제어법을 단순한 제어장치로 구성되는 이점을 갖지만, 제어장치의 소형화를 위해 동작 주파수를 수백[Hz]부터 수십[kHz]로 한 경우, 태양전지의 동특성상에 히스테리시스현상이 생겨 회수 전력의 저하를 초래한다.

본 연구에서는 히스테리시스 현상이 생기는 높은 동작 주파수 영역에 있어서도 회수 전력이 저하하지 않는 2차 제어법을 기초로 하여 PR 승강압 컨버터를 이용한 새로운 제어 측에 대하여 제안을 한다. 우선 해석 및 시뮬레이션에 의하여 그 동작 상태의 타당성을 조사했다.

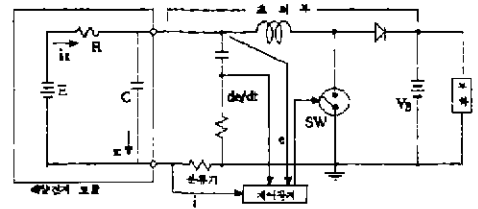


그림 4 태양광 발전 시스템 등가회로

3-1 새로운 제어법

태양전지에서의 출력 전력이 최대로 되는 전압 및 전류값을 각각 최적 전압, 최적 전류로 하면, 일반적으로 최적 전압은 판넬온도의 상승에 의해 약간 감소하고, 최적 전류는 일사량에 대해 비례하며 증가하는 특성을 갖고 있다. 결국, 최적 전류는 그 변화 범위가 보다 넓고, 그래도 경우에 따라서는 급격한

변화를 하는 것에 대해, 최적 전압의 변화 범위는 비교적 적다는 것에 주목하여 제어법을 만든다. 그림 5에 동작 주파수가 높을 때에서 태양전지모듈의 $i-c$ 특성 및 i_R-e 특성의 일례를 표시한다. 여기에서는 i_R 은 그림 4에 표시한 태양전지의 동작 회로의 R에 대한 전류이다.

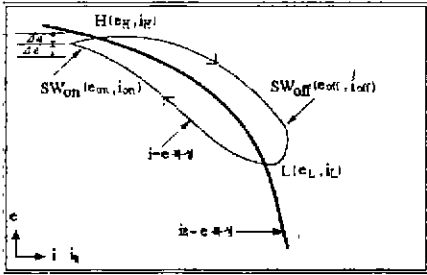


그림 5. 태양전지 모듈의 동특성의 예

i_R-e 특성은 높은 동작 주파수에 대해서도 항상 1차 함수로 표시되고, 이것은 정특성이다. 또한 $i-c$ 특성(동특성)과 i_R-e 특성(정특성)은 $de/di = 0$ ($i_c = 0$)로 되는 두 점, 즉 L점에 있어 일치한다. 지금 승압 초퍼 스위치의 on, off 제어 신호에는 태양전지의 출력 전압만을 사용하고, 그 각각은 e_{on} , e_{off} 로 한다. 또한 SW의 ON전압 e_{on} 을 고정하고, 다음으로 e_{on} 의 k ($0 < k < 1$)부의 전압을 SW의 OFF전압 e_{off} 로 정한다.

$$e_{off} = k \cdot e_{on} \quad (14)$$

이 ON, OFF의 1사이클에 있어, H, L의 두 점에 의한 전압비 및 전류 비를 각각 k_e , k_i 로 한다.

$$k_e = e_L / e_H \quad (0 < k_e, k_i < 1) \quad (15)$$

$$k_i = i_H / i_L$$

이때의 k_e 와 k_i 의 대소 관계를 비교하여, 아래와 같이 e_{on} 을 Δe 만큼 변화한다. 즉, m번째의 스위치의 ON 전압을 $e_{on(m)}$ 라 하면,

$$e_{on(m)} = e_{on(m-1)} + \Delta e \quad (k_e < k_i) \quad (16)$$

$$e_{on(m)} = e_{on(m-1)} - \Delta e \quad (k_e > k_i)$$

(단, $\Delta e > 0$, $m=1,2,3,\dots$)

이 반복에 의해 $k_e = k_i$ 로 되도록 제어를 한다. SW의 ON전압 e_{on} 을 수렴시킨다. 실제의 제어에

있어서는 H, L점의 전력을 계산기를 사용하여

$$P_H = e_H \cdot i_H = k_i \cdot e_H \cdot i_L \quad (17)$$

$$P_L = e_L \cdot i_L = k_e \cdot e_H \cdot i_L$$

을 계산하고, P_H 와 P_L 의 대소 관계로부터 k_e 와 k_i 의 대소 관계의 비교를 한다.

4. 시뮬레이션 결과

4-1 소프트 스위칭 승압형 컨버터

제안한 컨버터 회로에서 제어 스위치는 가변 저항 스위치로 가정하고 그 외 소자는 이상적인 소자로 하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 하였다. 스위치 동작에 대한 각부 동작 파형은 그림 6에 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 동작해석에서 얻어진 결과와 잘 일치한다. 시뮬레이션에 있어서 사용된 회로정수를 표1에 나타낸다.

표1 시뮬레이션에 사용된 회로정수

입력 전압	Vd	200 V
공진 인덕턴스	Lr	10 uH
공진 용량	Cr	100 nF
부하 전류	Io	100 A
스위칭 주파수	Fs	20 kHz

그림 6에는 각 모드의 구간에 대하여 나타내고 있으며 t_0 에서 스위칭이 운하면 Cr이 방전하고 t_1 에서 $V_{cr}=0$ 이 된다. t_2 에서 스위치를 오프하면 입력 전류에서 Cr이 충전하여 t_3 에서 $V_{cr}=V_i+V_{cd}$ 로 된다. t_4 은 i_{cr} 이 제로로 되는 시각이다. Ts는 스위치 동작의 1주기로 나타낸다.

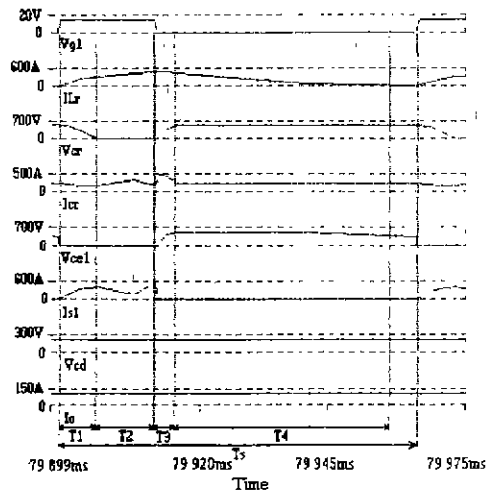
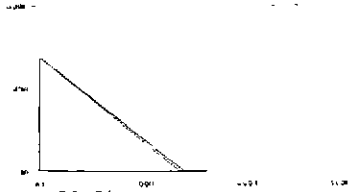


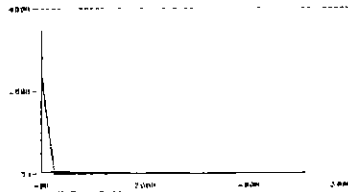
그림 6. 각 모드의 동작 파형

이 결과로부터 제어소자의 전압-전류특성은 그림 7과 같다. 그림 7(a)은 하드 스위칭 때이고, 그림 7(b)은 본 방식의 소프트 스위칭 때이다.

그림 7(a), (b)의 면적은 스위칭 손실과 비례하므로 서로 비교해 보면 소프트 스위칭의 손실이 대단히 적음을 알 수 있다.



(a) 하드 스위칭

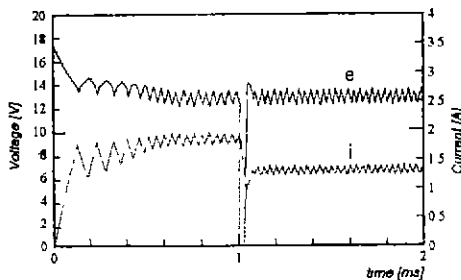


(b) 소프트 스위칭

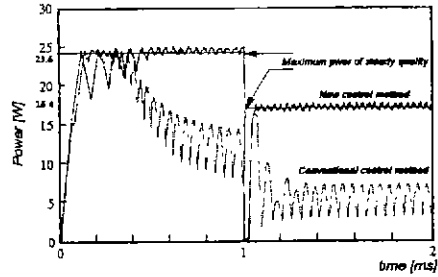
그림 7. 스위치의 전압-전류 특성

4-2 MPPT 응용 분야의 시뮬레이션 결과

그림 7에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 본 방식에 의한 제어시의 태양전지 모듈의 전압 및 전류 특성을 (a)에, 새로운 제어법 및 (1)식에 의한 종속제어법에 의한 경우의 회수 전력을 (b)에 표시했다. 제조건으로서 배터리 전압 24[V], $k=0.9$, 리액터 $L=1$ [mH]로 한다. 일사량은 $500[W/m^2]$ 로부터 $310[W/m^2]$ 까지 변화시키고 있다.



(a) 전압 및 전류 특성



(b) 출력 전력 특성

그림 8. 시뮬레이션 결과

5. 결론

제안한 부분공진형 고효율 승압형 컨버터 회로는 작동 모드와 시뮬레이션 결과로 스위칭 소자들이 ZCS, ZVS로 동작함을 알 수 있었고, 기존의 컨버터와 비교하여 같은 출력용량에서 제안된 컨버터는 스위칭 듀티율을 감소시키므로, 사용되어진 스위치들의 도통 손실이 감소되는 효과를 얻었다.

또한 부분공진 회로부의 스위치들은 PWM제어에 의해 구동되는 컨버터부의 스위치들과 서로 동기화 되어 소프트 스위칭으로 동작하여 스위칭손실이 저감되었다.

본 연구에서는 솔라셀에서 발생하는 직류 전력을 상용의 직류 전력으로 변환하는 대용량 DC-DC 전력변환에 관하여 검토하였으며, 제안한 소프트 스위칭형 대용량 DC-DC컨버터는 높은 효율로써 동작되었으며, 또한 스위칭 효율을 향상시킬 수 있는 태양광 발전 시스템을 제안하여 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 이상의 결과로 태양광 발전 시스템의 새로운 전력 변환 장치로써 응용 가능하리라 기대되며, 그 응용 분야로 태양광 발전 시스템의 최대전력점 추적 제어법으로 많이 활용되는 2차 제어법에 대하여 고찰하고, 그것을 개선한 새로운 제어법은 동작 주파수가 높게 되고 태양전지에 히스테리시스 현상이 생기는 경우에 있어서도 높은 회수 전력이 얻어지는 방법인 것을 시뮬레이션에 의해 확인했다.

앞으로는 실험회로를 제작하여 동작을 확인 할 예정이다며 또한 대용량화를 위하여 스위칭 손실을 줄이는 방법에 대해 연구하고자 한다.

참고 문헌

- [1] B.K. Bose, J.S. Lai, "An Improved Resonant DC Link Inverter for Induction Motor Drives", Conf. Rec. of IEEE/IAS Annu Meeting, pp. 742-7489 (1988)
- [2] 國吉: "新しい太陽光發電用インベータとその試験法", 太陽光發電システムシンポジウム (1989)
- [3] D.K. Kwak, H.W. Lee, "Single-Phase converter with partial resonant circuit", KJEE Autumn Conf. Rec. pp. 129-131 (1993)

- [4] D.K. Kwak, H.W. Lee, "Partial resonant PWM converter using snubber condenser", KIEE Spring the West & Kyung nam Local Conf. Rec, pp. 58-61 (1994)
- [5] Katsumi Ohniwa, Iwao Kurata : 「A new maximum Power Tracking Method of Photovoltaic Power Generator Taking Frequency Characteristics of Solar Cell Module into Consideration」
 IIEE, Vol. 112-D, No.3, pp.258-263, 1992
- [7]. 大庭, 藤卷, 江田 : 「太陽 電池 모듈의 動的 等價 回路」 日電學論 D. 109(1988)
- [8] 大庭勝實, 倉田 巖: "周波數特性を考慮した太陽光發電システムの最大出力制御", 日本電氣 學會, Vol. 112-D, pp.258-263, 1992.3.
- [9] 이현우 등, "태양광 발전을 위한 고효율 전력변환장치", 전기학회학술논문pp.450-452, 1996.7.21.
- [10] 이현우 등 : "부분공진 스위칭 모드 고효율DC-DC 부스트컨버터", 전기학회논문지Vol.45, No.9, pp.1272-1278, 1996.8.
- [11] Hyun-woo Lee: "Soft switching buck-boost converter for photovoltaic power generation", '96 Japen Solar Energy Society(JSES) Con. Rec., 1996.10.30.