

직류수용가 서비스를 위한 무접점 전원장치

강진원, 송환국, 김주훈, 김은수[†], 김윤희*
 전주대학교, 중앙대학교*

Contactless Power Supply for DC Power Service in Hybrid Home Generation System

J.W. Kang, H.K. Song, J.H. Kim, E.S. Kim, Y.H. Kim*
 Jeonju University, Chung-gang University*

ABSTRACT

Among the alternative energy sources, the solar energy is recognized as an important energy source and its application is increasing. Especially in future, the hybrid solar energy generation system with battery will be widely used as an independent distributed power generation system. In this paper, a solar power hybrid home generation system using a contact-less power supply (CPS) that can transfer an electric power without any mechanical contact by using magnetic coupling instead of the power transfer by directly supplying the DC power to the home electric system is proposed. The proposed system consists of a ZVS boost converter, a half bridge LLC resonant converter and contact-less transformer.

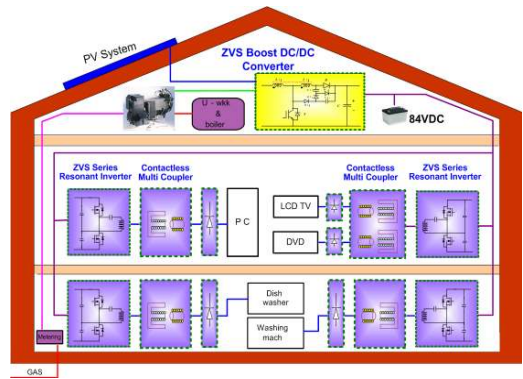
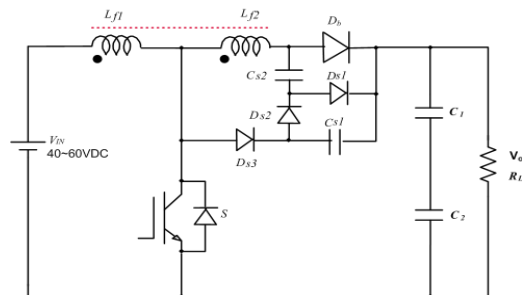


그림 1. 제안된 무접점 전원장치적용 수용가 직류서비스

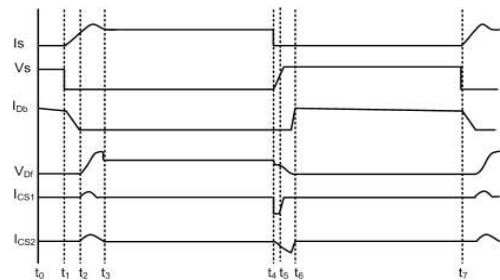
1. 서론

기존 태양광발전 시스템의 구성은 많은 전력변환기를 사용했기 때문에 전체시스템의 효율을 저감시키고 부피가 커진다는 단점을 가지게 되어 향후에는 하이브리드 전원 시스템 적용 수용가 직류 서비스의 사용이 증가될 것으로 예상 된다. 그림 1 처럼 본 논문에서 제안된 무접점 전원장치적용 수용가 직류 서비스를 위한 무접점 전원장치를 제안, 구성해 보았다. 제안된 수용가 직류서비스를 위한 무접점 전원장치는 탭-인덕터적용 무손실 스너버 Boost dc/dc 컨버터를 사용하여 태양전지와 연료전지에서 출력되는 낮은 전압(40~60VDC)을 84VDC로 승압시켜 배터리에 충전하고, 태양전지를 보호하기 위해 전력제어를 하였으며, 승압된 높은 전압을 주변 환경에 영향을 받지 않고, 부하에 안전하게 전력을 전달하기 위해 무접점 변압기를 적용한 직렬 공진 컨버터를 사용하였다. 무접점 변압기 2차측에 전달된 전력을 안정화하기 위해 별도의 레귤레이터를 사용하지 않고, 무접점 변압기와 별도의 제어용 마그네틱 커플러를 사용하여 출력전압/전류 제어 신호를 제어용 마그네틱 커플러 1차측에 비접촉으로 전달하여 정전압/정전류 제어를 할 수 있도록 구성하였다. 본 논문에서는 80W급 시제품을 제작하여 수용가 직류 서비스를 위한 무접점 전원시스템에 적용 실험한 결과를 서술 하였다.

2. 무손실 스너버 적용 Boost컨버터



(a) 제안된 고효율 Boost 컨버터



(b) 동작파형

그림 2. 제안된 고효율 Boost 컨버터 및 동작파형

태양전지에서 출력되는 전압(40 ~ 60VDC)을 84VDC로 승압 제어하여 배터리 충전 및 하프브리지 인버터(Half-bridge inverter) 입력전압을 공급하기 위해 고효율 무손실 스너버 적용 Boost 컨버터를 적용하였다. 고주파 스위칭방식 고효율 Boost 컨버터는 주 스위칭소자(S) 및 환류다이오드(D_b)의 스위칭 손실을 저감하기 위해 기존 Boost 컨버터에 무손실 스너버 기능을 갖는 탭-인덕터 적용 에너지 회생 스너버를 적용한 소프트 스위칭 Boost 컨버터를 제안하였다. 그림 2에서처럼 Turn-on 스너버 기능은 $t_1 \sim t_3$ 구간 동안 C_{s1}, C_{s2}에 따른 저 임피던스 경로를 제공함으로써 환류다이오드(D_b)에 영전압 스위칭을 제공한다. Turn-on 구간에서 C_{s2}는 $V_o + \frac{n_2}{n_1} \cdot V_i$ 전압으로, C_{s1}는 출력전압(V_o)으로 충전되고, Turn-off 구간 중 $t_4 \sim t_6$ 구간에 C_{s1}, C_{s2}의 방전전압에 따라 주스위칭 소자 S에 걸리는 Turn-off 서지 전압이 출력전압(V_o)로 억제됨으로써 영전압 스위칭(ZVS) 되는 특성을 갖는다.

3. 무접점 전력 전달을 위한 직렬 공진 컨버터

태양광 발전출력이 직류전압이기 때문에 직접적인 직류전압을 사용하여 가전기기 및 부하에 적용하는 부분에 있어 스위치 전원 투입과 차단 시 발생 될 수 있는 스파크 전압(Spark Voltage) 발생의 위험과 부주의로 인한 감전사고 및 누전사고 등의 문제점을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 무접점 변압기를 적용한 하프브리지(Half-bridge) 직렬공진컨버터를 제안 적용하였다. 그림 3 (a)와 (b)는 하프브리지(Half-bridge) 직렬공진컨버터에 적용된 무접점 변압기의 구조를 나타내었다. 무접점 변압기는 기존 변압기와 달리 큰 공극(Air-gap)을 가지고 있어, 자화인덕턴스(L_m)가 상대적으로 작은 값을 가지게 되고, 1차측 누설인덕턴스(L_{l1}) 및 2차측 누설인덕턴스(L_{l2}) 값이 증가하게 되어 결합계수(Coupling coefficient)가 낮은 특성을 갖게 된다.^[3] 이러한 특성을 갖는 무접점 변압기의 경우 자화인덕턴스(L_m)를 통한 자화전류(I_m)가 많이 흐르게 되어 1차측 에너지가 2차측으로 전달하는데 많은 어려움이 있다. 뿐만 아니라, 1차측과 2차측 권선방법 및 결합구조에 따라 1차측 및 2차측 누설인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})와 자화인덕턴스(L_m) 값의 변화가 많이 발생하기 때문에 회로해석에 있어 매우 중요한 고려사항으로 작용하게 된다.그림 4(a)은 무접점 변압기 적용 Half-bridge LLC 공진컨버터에 대한 주 회로이고, 그림 4(b)은 등가회로를 나타낸 것이다.그림 4(b) 등가회로의 임피던스 관계를 통해 표준화된 주파수 변화와 $Q(\frac{2\pi f_n L_{eq}}{R_{eq}})$ 변화에 대한 표준화된 주파수 변화($f_n = \frac{f_s}{f_r}$)에 대한 전압이득 특성 식은 식(1)과 같이 얻을 수 있다.

$$M = \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \cdot \left(A + \frac{B}{B+1}\right) + jQ(1+B) \cdot \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right|$$

(1) 식(1)을 이용한 시뮬레이션 된 그림 4은 1차측 누설인덕턴스(L_{l1})와 자화인덕턴스(L_m) 비 A($A = \frac{L_{l1}}{L_m}$)가 0.384 그리고 2차측 누설인덕턴스(L_{l2})와 자화인덕턴스(L_m) 비인 B($B = \frac{N^2 L_{l2}}{L_m}$)가 0.009일 때, 표준화된 주파수(f_n)와 Q 변화에 대한 무접점 변압기 적용 하프브리지(Half-bridge) 직렬공진컨버터에 대한 전압이득(|M|) 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 5의 표준화된 전압이득 특성에서 볼 수 있듯이 무접점 변압기 적용 하프브리지(Half-bridge) 직렬공진컨버터의 표준화된 주파수(f_n)가 1보다 낮은 주파수에는 전압이득이 증가하는 것을 볼 수 있고 표준화된 주파수(f_n)가 1보다 높은 주파수에서는 기존 직렬공진과 같은 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 표준화된 주파수(f_n)가 1보다 높은 주파수 영역에서의 스위칭 동작은 주 스위칭소자의 영전압 스위칭(ZVS)은 이를 수 있는 장점이 있지만, 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1})의 위상차에 의한 많은 순환전류가 흐르고, 특히, 전압이득이 낮은 영역에서 스위칭 동작을 하게 되므로 경부하에서 부터 중부하까지 부하변화 시 일정 출력전압을 제어하기 위해 너무 넓은 범위의 스위칭 주파수제어를 해야 하는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 무접점 변압기 2차측의 정류 다이오드에 흐르는 전류가 연속모드로 흐르기 때문에 무접점 변압기 2차측 정류 다이오드의 역 회복 특성에 의한 단락전류에 의해 출력전압에 노이즈가 발생하게 되어 낮은 효율특성을 갖게 된다. 이러한 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터^[3, 4, 5]의 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 그림 5에 나타낸 것처럼 표준화된 주파수($f_n = \frac{f_s}{f_r}$)가 1보다 낮은 영역 즉, 스위칭 주파수(f_s)를 공진주파수(f_r) 보다 낮은 주파수 영역에서 스위칭 동작을 하였다. 이러한 경우 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터와 같이 주 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)을 얻을 수 있고, 좁은 주파수 범위에서도 부하변화에 대해 일정 출력 전압을 제어할 수 있으며, 전압이득이 높은 영역에서 스위칭 동작하므로 높은 전압이득 특성에 따른 무접점 변압기 2차측 턴 수를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라, 불연속 공진전류에 의해 무접점 변압기 2차측 정류다이오드의 영전류 스위칭(ZCS)도 이를 수 있는 장점이 있다.

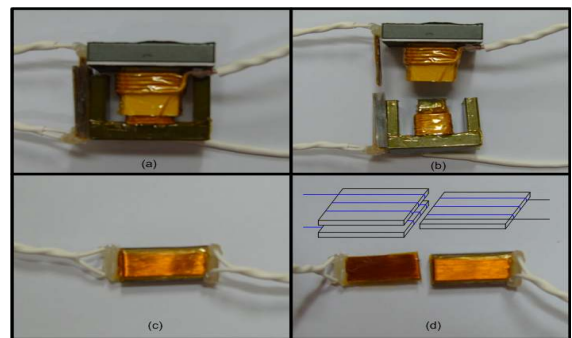
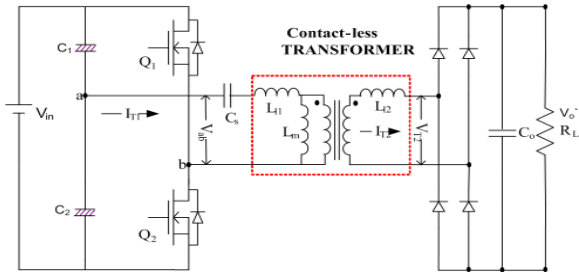
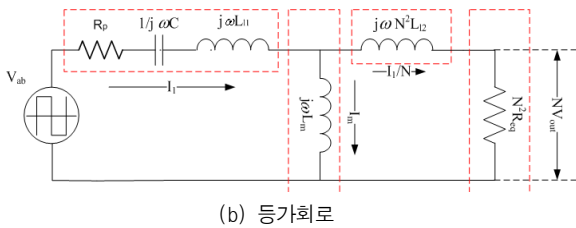


그림 3. 제안된 무접점 변압기[(a), (b)] 및 비접촉

데이터 통신용 커플러 사진



(a) 무접점변압기적용 Half-bridge 직렬공진컨버터



(b) 등가회로

그림 4. 무접점 변압기 적용 하프브리지(Half-bridge) 직렬 공진컨버터와 등가회로

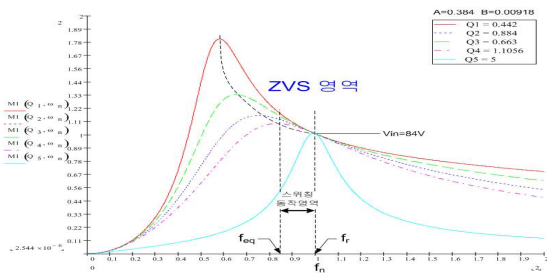


그림 5. 하프브리지 직렬 공진 컨버터 전압 이득 특성

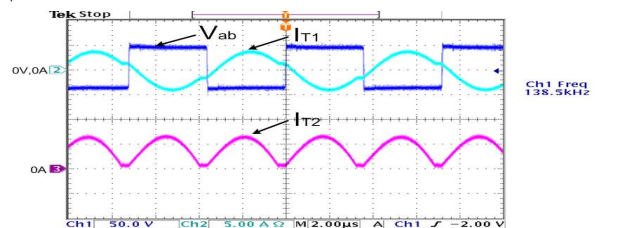
4. 마그네틱 커플러를 이용한 주파수제어

기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터는 2차측에서 별도의 레귤레이터를 사용하여 정전압 제어를 하였다. 이러한 방식은 전체 시스템의 효율저감과 함께 비접촉 변압기 2차측 정류부에서 별도의 안정화 전원 시스템 사용에 따라 부피가 증가하는 단점을 가지게 된다.^[2] 이 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 마그네틱 커플러를 이용하였다. 그러나 적용하고자 하는 데이터통신용 마그네틱 커플러에는 적은 전류가 흐르고 있는 반면에 주 변압기는 많은 전류가 흐르고 있어, 주 변압기의 자속이 데이터 통신용 커플러에 쇄교된 유기전압에 따라 불안정한 제어를 하게 된다. 그리고 적용하고자 하는 데이터통신용 마그네틱 커플러는 누설 인덕턴스가 크고 자화 인덕턴스는 상당히 작아 매우 작은 커플링 값($k=0.113$)을 가지게 되어, 1차측의 신호가 2차측에 제대로 전달되지 못하는 단점을 가지고 있다. 권선방법을 통해 주 변압기의 자속이 데이터통신용 마그네틱 커플러에 영향을 받지 않고, 제어용 1차측 커플러의 신호가 제어용 2차측 커플러에 전달될 수 있는 권선 방법을 제안 적용하였다. 제어용 마그네틱 커플러는 그림 3 (c), (d)와 같이 제어용 1차측 커플러는 ‘-’형 모양이며, 제어용 2차측 커플러는 ‘ㄷ’형

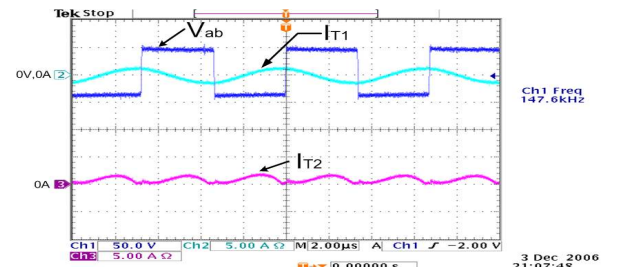
모양을 나타내고 있으며, 데이터 통신용 마그네틱 커플러와 무접점 변압기의 권선 방향을 서로 직각이 되도록 하여 무접점 변압기 자속의 영향을 최소화 시켰고, 데이터 통신용 마그네틱 커플러의 2차측 권선을 ‘ㄷ’형 모양으로 서로 포개는 방식으로 커플링 되는 면적을 넓혀 1차측의 신호를 2차측으로 전달할 수 있게 하였다.

5. 실험 결과

본 논문에서 태양광에서 출력되는 낮은 전압(40~60VDC)을 높은 전압(84VDC)으로 승압하기 위한 150W급 무손실 스너버 적용 Boost 컨버터와 Boost 컨버터를 통해 승압된 직류전원(84VDC)을 부하에 안전하게 전달하기 위한 무접점 변압기를 적용한 80W급 Half-bridge LLC 직렬공진 컨버터를 설계 제작하였다. 그림 6 (a), (b)는 경부하시 (10W)와 중부하시 (80W)의 직렬 공진 컨버터의 인버터 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1}), 무접점 변압기 2차측 정류다이오드의 전류 실험 파형이다. 그림 7는 부하변화에 따른 출력전압(V_o), 출력전류(I_o) 실험 파형이다. 부하가 경부하 (7.2W) \Rightarrow 중부하 (80W) \Rightarrow 경부하 (7.2W)로 가변되어도 실험파형과 같이 일정 출력전압으로 제어됨을 볼 수 있었다. 그림 8은 탭-인덕터적용 무손실 스너버 Boost컨버터의 입력전압 변화와 부하 변화에 대한 효율 특성을 나타 낸 것이다. 일사량에 따라 수시로 변하는 태양전지 출력전압을 고려하여 입력전압을 40~60VDC로 변화시키고, 10W~150W 부하범위에 대해 효율을 측정하였다. 그림 9는 무접점 변압기 적용 Half-bridge LLC 직렬공진컨버터의 효율 특성 곡선을 나타낸 것이다. Boost컨버터에서 출력되는 전압이 일정한 전압 (84VDC)인 것을 고려하여, Half-bridge LLC 직렬공진컨버터의 입력전압은 84VDC로 고정시킨 후, 10W~80W 부하범위에 대해 81%~87%의 효율을 얻을 수 있었다. 그리고 그림 10는 전체시스템에 대한 효율특성을 나타 낸 것이다. 그림 11는 수용가 직류서비스를 위한 무접점 전원장치를 적용하여 가전기기인 LCD TV를 동작시키고 있는 시제품 사진이다.



전류파형 [50V/div., 5A/div., 1us/div.]
(a) 중부하(80W)인 경우(50V/div., 5A/div., 10A/div., 2us/div.)



(b) 경부하(7.2W)인 경우(50V/div., 5A/div., 2A/div., 2us/div.)

그림 6. 직렬공진 컨버터의 비접촉 변압기 1차측 단자전압과 전류 및 2차측 정류전류

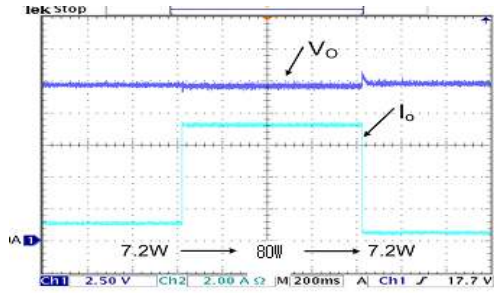


그림 7. 부하변화에 따른 출력전압과 출력전류 실험파형

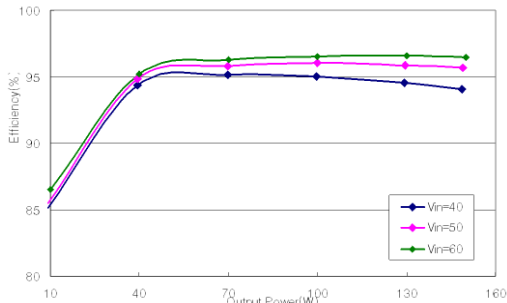


그림 8. 무손실 스너버 적용 Boost컨버터의 입력전압과 부하변화에 따른 효율 특성

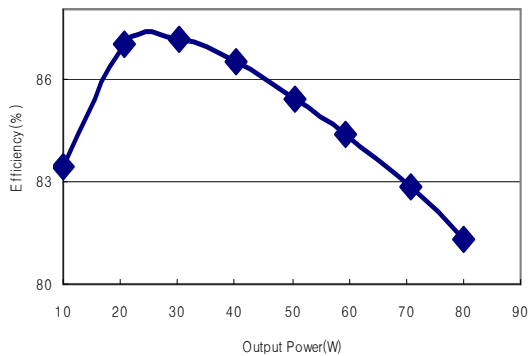


그림 9. 무접점 변압기 적용 직렬공진 컨버터의 부하변화에 대한 효율특성

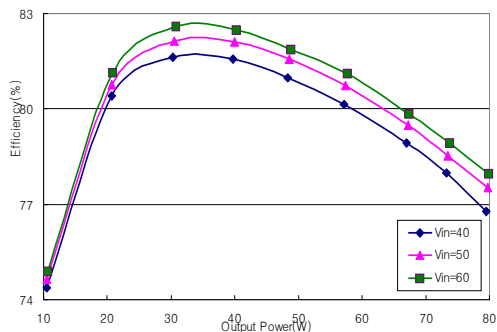


그림 10. 직류서비스를 위한 무접점 전원전체시스템에 대한 효율특성

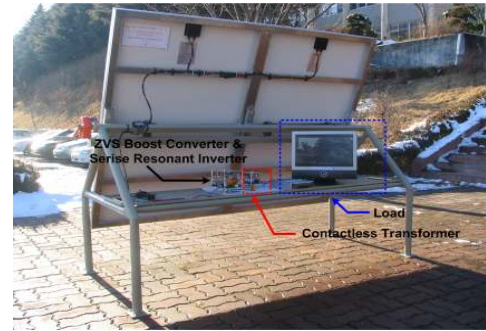


그림 11. 무접점전원장치 적용 LCD TV 구동 동작사진

6. 결론

본 논문에서는 기존 태양광 시스템구성은 많은 전력변환기를 사용하기 때문에 효율이 많이 떨어 지는데 이문제점을 개선 하기 위해서 무접점 변압기를 적용한 전원장치를 제안하고 시제품을 제작하였다. 소프트스위칭을 적용하여 스위칭 손실을 저감시켜 전력변환의 효율을 높였다. 실험결과 10W~80W 부하범위에 대해서 전체시스템효율이 81%~87%의 효율특성을 얻을 수 있었으며, 2차측 정류다이오드의 불연속전류에 의해 스위칭 손실을 줄일 수 있었고, 무접점으로 전력을 전달하므로 개폐 스위치전원 투입과 차단 시 스파크전압 발생 위험성 및 환경에 영향을 받지 않고 전력을 안전하게 전달할 수 있어, 무접점 전원장치가 직류수용가 서비스에 적용 가능함을보였다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-11173-0(2007)) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 장길수, 손광명, "수용가 직류서비스 및 마이크로그리드" 대한전기학회 전기의 시계, 제54권 12호, pp.31-35, 2005.
- [2] 이현관, 공영수, 김은수, 김윤희, 이기식, 강성인, 정봉근, "태양광 발전 시스템을 위한 무접점 전원장치", 전력전자학회논문지 제 11권 제3호 pp.216-223, 2005
- [3] 공영수, 김은수, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진 컨버터" 전기학회논문지 제54B권 1호 pp.33-39, 2005
- [4] 정봉근, 강성인, 김은수, 김윤희 "수용가 직류 서비스를 위한 무접점 전원장치", 전력전자학회논문지 제12권 제2호 pp.174-182, 2007
- [5] G. B. Joung, and B. H. Cho, "An Energy Transmission System for an Artificial Heart Using Leakage Inductance Compensation of Transcutaneous Transformer", IEEE Trans, PE, Vol. 13, 1998.