

신재생에너지 연계용 고효율 승압형 DC-DC Converter 회로 토폴로지 개발

(Development of High Efficiency DC-DC Converter Circuit Topology for Renewable Energy Application)

정태욱* · 김주용**

(Tae-Uk Jung · Ju-Yong Kim)

요 약

본 논문에서는 배터리전원 또는 태양광과 연료전지 등의 신재생 전원에서 발생하는 저전압 에너지를 고전압으로 변환하기 위한 DC-DC 컨버터의 설계에 대해 연구하였다. 입력 DC24[V] 전압을 출력전압 400[V]로 변환하기 위한 H-브리지 컨버터의 회로 토폴로지에 있어 출력측 전력 및 전압을 제어하기 위해 위상천이제어를 적용하여 구현하였다. 제안된 컨버터 시스템의 장점으로는 전류 스트레스 감소 및 높은 효율성, 신뢰성 및 단순화된 관리뿐만 아니라 저렴한 비용 등을 들 수 있으며, 가정용 전력 생산을 위한 시스템으로 매우 유용하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

This article studies the design of DC-DC Converter to convert low-voltage energy sources generated from renewable power like battery power, photovoltaic power, or fuel cells into high-voltage ones. The circuit topology of H-bridge Converter to convert input voltage, 24[V], into out voltage, 400[V], was realized through applying phase shift angle control so as to manage electric power and voltage in the output side. The advantages of the converter system suggested are the low cost as well as current stress reduction, high efficiency, reliability, and simplified maintenance. It is also found that the system is highly useful to produce residential electric power.

Key Words : DC-DC Converter, Two Split-Phase, Voltage Doubler

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 박사수료
Tel : 055-249-2628, Fax : 055-249-2839
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2009년 8월 21일
1차심사 : 2009년 8월 24일
심사완료 : 2009년 10월 27일

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 및 유가 상승, 에너지 수요의 증가로 인해 신재생 에너지원과 이를 효율적으로 활용하기 위한 전력변환시스템에 대한 연구가 활발히

진행 중이다. 그 이유로서는 태양광, 연료전지, 풍력 등의 신재생 에너지원의 이용과 군수용의 고성능 장비의 필요성 증대와 국민소득의 증가로 인해 사람들의 여행 및 레저 활동에 대한 관심이 높아져 아웃도어 활동을 위한 휴대용 전원장치에 대한 필요성이 높아지고 있다. 이러한 신재생 에너지 시스템의 기술개발에 있어 가장 중요한 기술은 에너지 발생원에 대한 고효율 및 저가격화와 생성된 전기에너지를 상용 전압의 형태로 변환하기 위한 고효율 전력변환회로가 필요하다. 본 논문에서는 배터리전원 또는 태양광과 연료전지 등의 신재생 전원에서 발생하는 저전압 에너지를 고전압으로 변환하기 위한 DC-DC 컨버터의 설계에 대해 연구하였다. 입력 DC 24~48[V]전압을 출력전압 400[V]로 변환하기 위한 H-bridge 컨버터의 회로 topology에 있어 출력측 전력 및 전압을 제어하기 위해 Phase shift angle control을 적용하여 구현하였으며, 3[kW]의 전력을 2차측에 효과적으로 전달하기 위한 적절한 사양의 고주파용 변압기를 실험적 해석에 의해 선정하고 제작하였다. 마지막으로 제작된 회로시스템의 연속동작시 열적 안정성을 테스트하기 Infrared Solution사의 적외선 열화상카메라를 이용하여 출력측에 부하를 인가하면서 Power stack의 온도상승을 체크하고 분석 하였으며, 실험을 통해 DC-DC 컨버터에 대한 회로설계 및 동작특성을 평가하고자 한다.

2. DC-DC 컨버터

2.1 DC-DC 컨버터의 회로 및 동작 원리

전체 회로 및 시스템 구성은 아래 그림 1과 같으며, 변압기 좌측의 단상 Full bridge는 배터리 전압을 이용해 변압기에 입력하기 위한 구형과 펄스 전압을 만들기 위한 회로이며, 변압기 우측의 정류회로는 변압기 2차측 출력단의 승압된 펄스전압을 정류하여 DC 출력전압을 만드는 회로로서 커패시터를 이용한 배전압 (voltage doubler)회로의 특성을 가진다.

제어신호는 각 Arm 간의 Phase shift angle을 제어하여 1차측으로 에너지를 전달하며 Phase shift control은 ATmega128을 이용하였다. 실험에 사

용된 Power switch (Q1~Q4)는 ST Tomson사의 자동차용 저전압 대전류용 MOSFET 스위치인 STE250NS10S(상온 250[A])를 2개 병렬로 적용하였다. 그림 2는 연료전지용 DC-DC 컨버터의 각부 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다. 한주기에 Q1은 Q3과 Q2는 Q4와 상보적으로 반주기의 시비율을 가지며, 영전압 스위칭을 하기 위해서 Q1은 Q4와 Q2는 Q3과 서로 위상 천이되어 실효 시비율(Deff)을 조정하게 된다.

그림 1의 저압인 1차측의 컨버터를 스위칭하기 위한 방법을 그림 3에 나타낸다. 그림 3에서 컨버터의 각 스위치의 스위칭 폭은 항상 일정하게 도통하며 입력 에너지의 제어는 각 Arm간의 위상각 (phase shift angle)을 제어함으로써 조절할 수 있다. 그러므로 제어기의 PWM 발생부분의 프로그램이 용이한 장점이 있다.

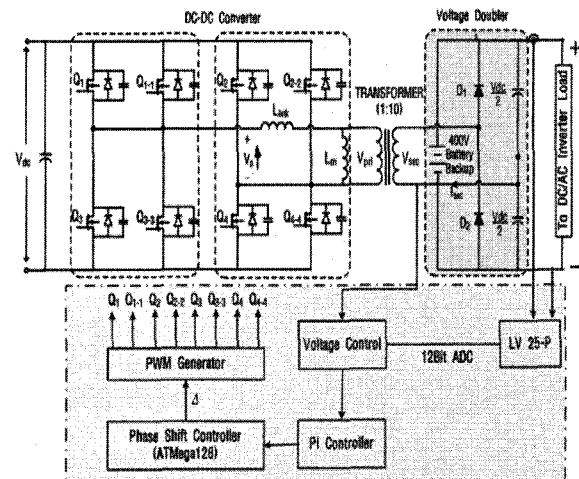


그림 1. 승압형 DC-DC 컨버터의 회로구성
Fig. 1. Circuit composition of step-up DC-DC converter

이러한 Full bridge 컨버터의 교번 스위칭에 의해 변압기에 배터리 입력전압의 +V와 -V를 최고치로 하는 AC 구형과 펄스전압이 변압기에 입력된다. 변압기에 입력된 AC 구형과 펄스전압은 변압기의 턴수비인 1 : 10로 승압되어 Half bridge 형태의 배전압 정류회로에 입력된다. 변압기 2차측의 출력전압의 극성에 따라 각각의 정류다이오드를 통해 커패시터를 충전하게 되어 V2의 직류전압이 형성된다.

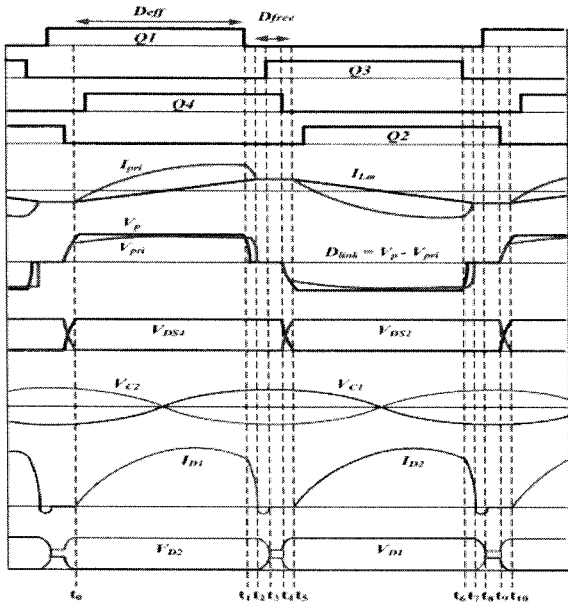


그림 2. 승압형 DC-DC 컨버터의 전압 전류 파형
Fig. 2. Voltage and current waveforms of step-up DC-DC converter

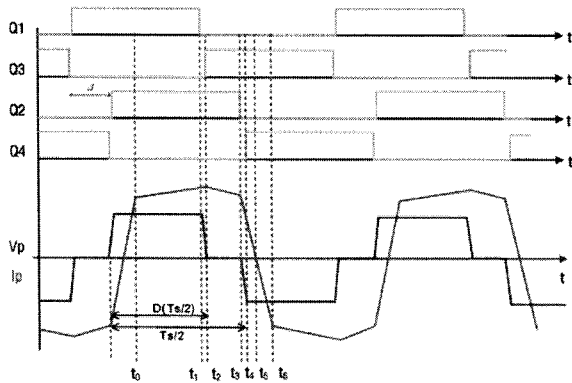


그림 3. 컨버터의 스위칭 제어 패턴
Fig. 3. Switching control pattern of converter

1차측 입력 DC전압과 2차측의 출력 DC전압의 관계는 아래의 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$V_2 = 2 \cdot V_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\Delta}{180^\circ} \quad (1)$$

여기서, V1은 입력 DC전압, V2는 출력 DC전압, N1과 N2는 변압기 1차측과 2차측의 권선 수, Δ는 phase shift angle을 나타낸다. 2차측 출력측은 배전압 정류부로서 요구 출력전압 대비 변압기의 권선비를 1/2로

저감시킬 수 있어 이 회로에 있어 가장 큰 손실원인 변압기의 누설자속에 의한 손실을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 병렬로 결합된 보조배터리는 커패시터와 동일한 역할을 하여 커패시터의 용량도 다운됨으로써 경제적인 기술 안이다.

2.2 DC-DC 컨버터의 전력 전달 원리

Full bridge 컨버터와 배전압 회로는 그림 4와 같이 스위칭 주파수 20[kHz]로 제어되고, 위상각 Δ의 제어에 의해 저압측과 고압측에 구형파 전압이 형성된다. 변압기의 누설인덕턴스를 통과하는 전류 i_s 는 ωt의 함수이며 아래와 같이 그 전류파형이 설명된다. 여기서, ω는 스위칭 주파수이다.

▶ Point 1~2

Point 1에서는 VL이 positive가 되고 VH는 negative로 유지되어서, positive 전압이 누설인덕턴스 양단에 인가되므로, point 2(ωt = Δ)까지 여전히 전류가 증가한다. point2의 전류는 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$i_s(\delta) = \frac{V_L + V_H}{\omega L_s} \Delta + i_s(0), \quad \omega t = \Delta \quad (2)$$

VL은 저압측 전압이며 VH는 고압측 전압이다. 적절한 제어에 의해 VL은 VH에 비해 값의 크기가 변동될 수 있다. 이 때 i_s 의 피크전류는 VL = VH가 될 때 최소가 될 것이다. 그림 4의 경우는 VL < VH의 경우를 보여준다.

▶ Point 2~3

Point 2에서 VH은 positive가 되고 VL도 positive로 유지된다. 이 때 VH가 VL보다 크므로 point3(ωt = π)까지 누설인덕턴스 양단에 negative 전압이 인가되어 전류가 감소되어 식 (3)과 같이 표현된다.

$$i_s(\pi) = \frac{V_L - V_H}{\omega L_s} (\pi - \Delta) + i_s(\Delta), \quad \omega t = \pi \quad (3)$$

▶ Point 3~4

Point 3에서는 VL이 negative로 바뀌고 VH는 positive로 유지되므로, 비교적 큰 negative 전압이 누설인덕턴스 양단에 인가되므로 point 4($\omega t = \pi + \Delta$)까지 전류가 감소한다.

$$i_s(\pi + \Delta) = \frac{V_L + V_H}{\omega L_s}(\pi - \Delta) + i_s(\pi), \omega t = \pi + \Delta \quad (4)$$

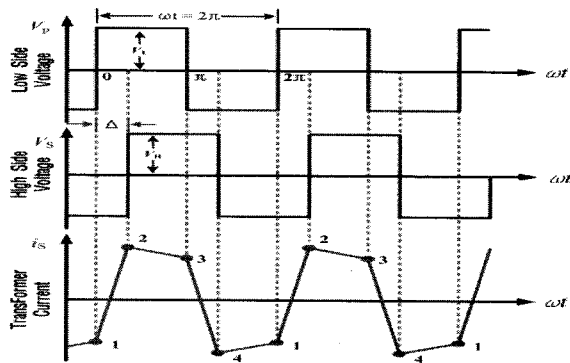


그림 4. 변압기 양단의 이상적인 전압과 전류 파형
Fig. 4. Idealized voltage and current waveform of transformer

▶ Point 4~1

Point 4에서는 전압 VL은 negative로 유지되고 VH의 전압 또한 negative로 바뀐다. 이 때 VH의 진폭이 VL보다 크므로 누설인덕턴스 양단에 조금의 양전압이 인가되어 point 1($\omega t = 2\pi$)까지 전류가 증가한다.

$$i_s(2\pi) = \frac{V_L - V_H}{\omega L_s}(\pi - \Delta) + i_s(\pi + \Delta), \omega t = 2\pi \quad (5)$$

위의 식 (2)~(5)에서 $i_s(\Delta) = -i_s(\pi + \Delta)$ 와 $i_s(\pi) = -i_s(2\pi)$ 인 관계가 있다. 즉, 전류와 전압의 정확한 관계는 식 (2)~(5)를 통해서 식 (6)과 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s(\Delta) = \frac{2V_L\Delta + (V_H - V_L)\pi}{2\omega L_s} \quad (6)$$

$$i_s(\pi) = \frac{2V_H\Delta + (V_L - V_H)\pi}{2\omega L_s} \quad (7)$$

위의 이러한 전류 $i_s(\omega t)$ 의 표현에 의해 변압기를 통해 전달되는 전력은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$P = \frac{V_H V_L \Delta (\pi - \Delta)}{\omega L_s \pi} \quad (8)$$

그림 4와 위에서 구해진 식에 의해 다음과 같은 3가지 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 전력은 변압기의 누설인덕턴스를 통해 전달된다.
- 2) 변압기의 저압 및 고압 양측 사이의 전압의 위상차를 제어함으로써 변압기를 통해 전달되는 전력뿐만 아니라 고압측의 DC 전압을 제어할 수 있다.
- 3) 만약 $V_L = V_H$ 와 같이 제어된다면 전류파형은 보다 완만해질 것이다. 즉, 피크 전류는 보다 작아진다.

3. 실험 결과

구현된 전체 시스템은 그림 5와 같다. 저전압(24~48[VDC])을 승압(400[VDC])시키기 위한 3[kVA] 급 DC-DC 컨버터와 제어회로부로 구성되며, Controller의 프로세서는 ATmega128을 이용하였으며, Gate Drive는 Photo Coupler TLP250을 적용하여 구성하였다.

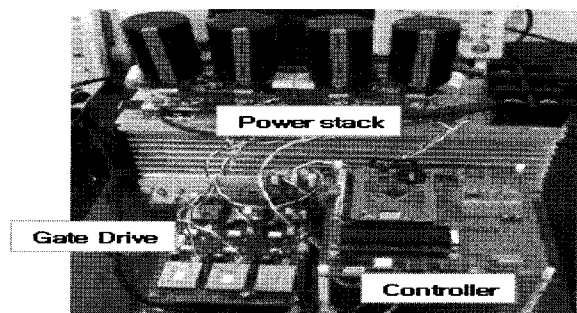


그림 5. DC-DC 컨버터의 회로구성
Fig. 5. Circuit composition of step-up DC-DC converter

표 1은 DC-DC 컨버터의 실험에 사용된 회로정수를 나타낸 것이다. 승압용 변압기는 페라이트 코어를 활

용하여 제작하였으며, 1차와 2차의 권선비는 1 : 10으로 최종 설계하였다. 표 1에 나타난 저항과 인덕턴스 데이터는 20[kHz]의 주파수 대역에서 측정하였으며, 제작된 변압기의 사진은 그림 6과 같다.

표 1. 실험에 사용된 회로정수
Table 1. Circuit parameter using Experiment

Spec	unit	Paper from
1. 입력 전압	[V](DC)	24~48
2. 출력 전압	[V](DC)	400
3. 정격용량	[kVA]	3 이상
4. PWM 주파수	[kHz]	20
5. Transformer		
	Primary	Secondary
턴 수	1(2parallel)	10
L	0.7[uH]	889[uH]
R	0.006[Ω]	0.75[Ω]
재질	Liz wire ($\text{pai}0.10 \times 1200$)	Liz wire ($\text{pai}0.10 \times 1200$)

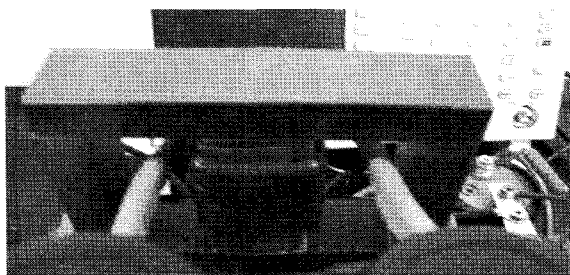


그림 6. 제작된 승압용 변압기의 사진
Fig. 6. Picture of manufactured step-up transformer

그림 7은 제작된 시작기의 특성을 측정 분석하기 위한 시스템의 구성을 보여주고 있다. DC power supply는 Argantix사의 150[V]/100[A] 사양의 2대를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 입력전압의 리플을 저감시키기 위해 12[V]/150[AH]의 배터리 2개를 직렬 연결하여 DC power supply에 병렬 연결하였다. 2차측 출력단의 부하는 다만 Chroma사의 63204(10[A]/500[V], 5.2[kW])를 적용하여 정전압 부하모드로 270[V]를 설정하여 부하를 인가하였다.

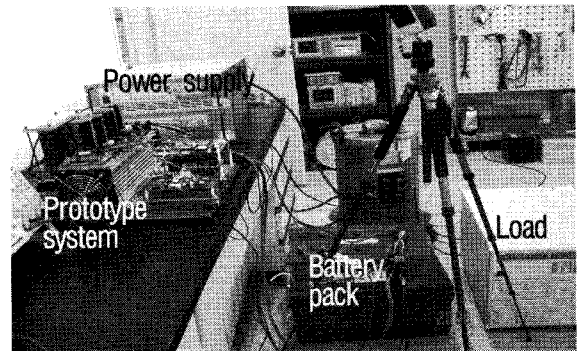
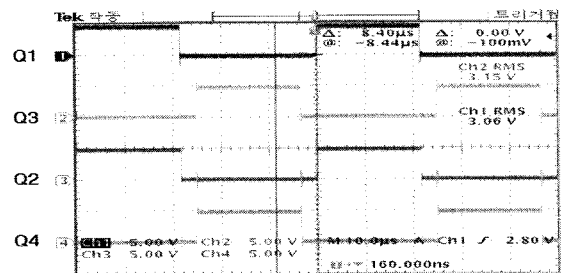
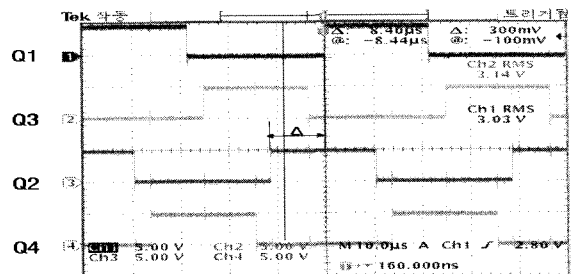


그림 7. 특성 분석을 위한 시스템의 구성도
Fig. 7. Schematic diagram of system for quality analysis

그림 8은 1차측 DC-DC 컨버터의 Gate signal을 보여주고 있다. (a)는 phase shift angle이 영인 상태에서 2차측 출력전압은 영전압이 된다. 반면에 (b)는 phase shift angle이 90도인 상태를 보여주고 있다. 이때는 전체 위상 중에서 50[%]의 구간동안 1차측의 에너지를 1차측으로 전달할 수 있다. PWM 주파수는 20 [kHz]이며, arm short를 방지하기 위한 dead time은 3.4[μs]로 설정하였다.



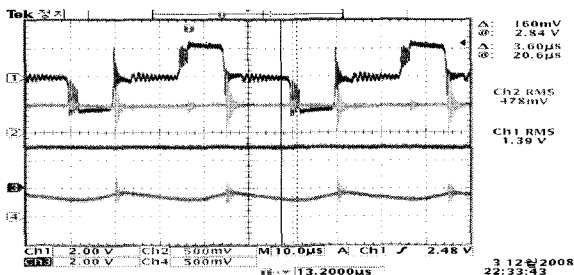
(a) phase shift angle : 0 deg



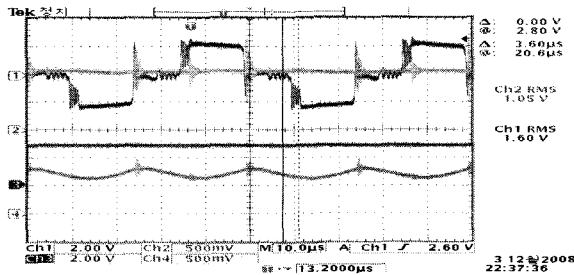
(b) phase shift angle : 90 deg

그림 8. 컨버터의 게이트 신호
Fig. 8. Gate signal of converter

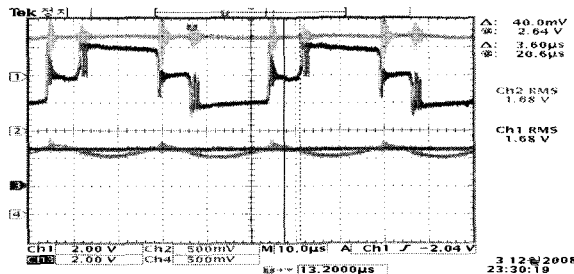
그림 9는 출력이 1[kW], 2[kW], 3[kW] 일 때의 출력 전압 및 전류 파형 측정 결과를 나타낸다. Ch.1은 1차측 변압기 양단 전압 v_1 (20[V/div]), Ch.2는 1차측 (저압측)인 입력측 전류 파형 i_1 (50[A/div])을 보여주고 있으며, Ch.3과 Ch.4는 2차측 고압측의 전압 v_2 (200[V/div]) 및 전류 파형 i_2 (5[A/div])를 보여주고 있다. 1차측 변압기 양단에서는 저전압 고전류의 스위칭에 의해 다소의 전압 링(ring)현상이 발생되지만, 저전압 스위칭의 일반적 현상이며 컨버터의 안정성에는 크게 문제가 되지 않는다.



(a) 출력 1[kW]일 때



(b) 출력 2[kW]일 때



(c) 출력 3[kW]일 때

그림 9. 1차측 및 2차측의 전압 및 전류 파형
Fig. 9. Voltage and current waveforms of the primary and the secondary

그림 9에서 실험결과 목표했던 2차측 출력 3[kW] 이하에서 2차측 전압 270이상을 유지할 수 있도록 제작되었음을 확인하였다. 최대출력인 3[kW]일 때 2차측 출력전압을 270[V]로 유지하기 위한 Phase shift angle은 155[°](controller의 phase shift value 표시치는 310)이다. 그림 10에서와 같이 출력에 대한 평균 효율은 80[%] 수준이며, 저전압 고전류 스위칭으로 인한 1차측 power stack에서의 손실이 다소 큼을 알 수 있다. 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 시제품 제작에서 추가적인 개선이 필요하다.

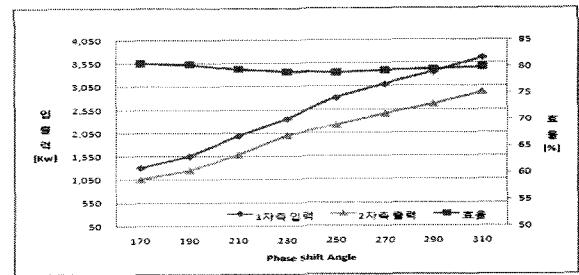


그림 10. 입·출력 효율 특성
Fig. 10. The Characteristics input and output efficiency

제작된 회로시스템의 연속동작시 열적 안정성을 테스트하기 위해 아래 그림 11과 같은 실험시스템을 구성하고 출력측에 부하를 인가하면서 Power stack의 온도상승을 체크하였다. Power stack의 온도상승을 측정하기 위해 Infrared Solution사의 적외선 열화상 카메라를 적용하였다.

그림 12는 온도상승 측정 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 1차측 DC-DC 컨버터에서 H-bridge에서 한쪽 arm의 온도상승이 다른 arm보다 높게 나타나고 있는 문제가 발견되었다.

이는 컨버터의 영전압 스위칭시 왼쪽 암과 오른쪽 암이 서로 다른 방식으로 ZVS가 행해지는데 왼쪽 암은 출력 필터에 저장된 에너지에 기인하여 ZVS가 행해지며 오른쪽 암은 누설인덕턴스에 저장된 에너지만으로 ZVS가 수행된다. 따라서 왼쪽 암이 더 넓은 ZVS 영역을 갖게 되고 오른쪽 암은 좁은 영역에서 ZVS가 이루어지므로 왼쪽 암보다 오른쪽 암이 열이 더 많이 발생된다.

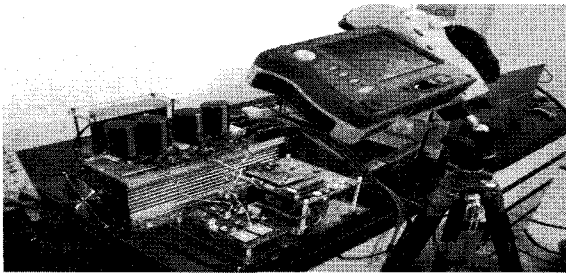


그림 11. Power stack의 열적 안정성을 체크하기 위한 실험시스템 구성
 Fig. 11. Experiment system for check thermal stability of DC-DC converter

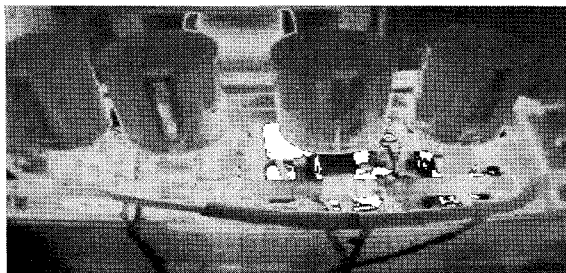


그림 12. 온도상승 측정 결과
 Fig. 12. The results of temperature measurements

5. 결 론

본 논문에서는 배터리전원 또는 태양광과 연료전지 등의 신재생 전원에서 발생하는 저전압 에너지를 고전압으로 변환하기 위한 DC-DC 컨버터의 설계에 대해 연구하였다.

- (1) 입력 24[V]전압을 출력전압 400[V]로 변환하기 위한 H-bridge 컨버터의 회로 topology에 있어 출력측 전력 및 전압을 제어하기 위해 Phase shift angle control을 적용하여 구현하였다.
- (2) 3[kW]의 전력을 2차측으로 전달하기 위해 적절한 사양의 고주파용 변압기를 실험적 해석에 의해 선정하고 제작하였다.
- (3) 저전압 고전류의 스위칭을 기반으로 하는 DC-DC 컨버터에서는 무엇보다도 중요하면서도 기술적인 관심이 필요한 부분은 저전압측인 변압

기 1차측의 Power stack의 설계임을 알 수 있었으며, 컨버터의 전류통전 라인의 저항분포, DC-Link 커패시터의 사양에 의해 입출력 특성에 큰 변화를 줄 수 있음을 확인하였다.

- (4) 제안된 컨버터 시스템의 장점으로는 전류 스트레스 감소 및 높은 효율성, 신뢰성 및 단순화된 관리뿐만 아니라 저렴한 비용 등을 들 수 있으며, 가정용 전력 생산을 위한 시스템으로 매우 유용하다는 것을 알 수 있었다.

이 연구결과물은 2009학년도 경남대학교 신진교수연구비 지원에 의한 것임

References

- [1] R. C. Dugan and T. E. McDermott, "Distributed generation," IEEE Ind. Applicat. Mag. vol. 2, pp. 19-25, Mar./Apr. 2002.
- [2] H. B. Puttgen, P. R. MacGrego, and F. C. Lambert, "Distributed generation : semantic hype or the dawn of a new era," IEEE Power Energy Mag. vol. 1, pp. 22-29, Jan./Feb. 2003.
- [3] G. J. Miranda, "Be prepared! [power industry deregulation]," IEEE Ind. Applicat. Mag. vol. 9, pp. 12-20, Mar./Apr. 2003.
- [4] T. A. Nergaard, J. F. Ferrell, L. G. Leslie, and J. S. Lai, "Design considerations for a 48 V fuel cell to split single phase inverter system with ultracapacitor energy storage," in Proc. IEEE 33rd Annu. Conf. PowerElectronics Specialists Conf. (PESC'02), vol. 4, June 23-27, 2002, pp. 2007-2012.

◇ 저자소개 ◇

정태욱 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대 전기공학과 조교수.

김주용 (金周容)

1977년 12월 1일생. 2002년 경남대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동대학원 전기공학과 박사수료.