

고정시비율 공진 컨버터를 이용한 연료전지용 2kW급 양방향 컨버터

오은태, 김원용, 정유석, 이준영
명지대학교 전기공학과

2kW Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell using Unregulated LLC Resonant Converter

Eun-Tae Oh, Won-Yong Kim, Yu-Seok Jeong, Jun-young Lee
Dept. of Electrical Eng. Myongji University

ABSTRACT

최근 화석에너지원의 고갈과 고유가 및 지구 온난화 방지를 위해 국가별로 이산화탄소 배출량을 규제하기 시작하면서 신재생 에너지의 사용에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중 연료전지가 한 부분을 차지하고 있으며, 연료전지는 친환경적이고 효율적인 에너지원으로서 근 미래의 새로운 대체 에너지로서 각광 받으며 여러 분야의 전기장치로 사용될 수 있다. 연료전지는 낮은 출력전압과 높은 출력전류를 갖는 특징이 있으며, 부하에 따라 출력전압이 변화하는 특성이 있기 때문에 연료전지의 사용을 위해서는 다양한 부하조건에서 연료전지와 연동된 승압 또는 강압형 컨버터의 제작이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 DSP를 이용하여 컨버터의 디지털 제어가 가능하며, 고정 시비율로 동작하는 LLC 공진형 컨버터를 이용한 2kW급 연료전지용 양방향 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 양방향으로 동작하며, 에너지 저장 및 재사용을 목적으로 하고, 출력은 24V 배터리가 된다.

1. 서 론

최근 심각한 환경오염과 에너지 자원의 고갈에 대한 문제가 심각하게 대두되면서 새로운 에너지원에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 하나가 친환경적이고 효율적인 에너지원인 연료전지이다. 연료전지는 저전압, 대전류의 특성을 가지고 있기 때문에 이를 상용전원 또는 배터리를 이용한 에너지저장을 목적으로 사용하기 위해서는 DC-DC 컨버터를 통한 전력변환 시스템이 필수적이다. 하지만 기존의 DC-DC 컨버터의 낮은 효율은 연료전지 시스템 전체의 효율을 감소시키게 되는 문제점을 가지고 있기 때문에 시스템의 효율을 높이기 위해서는 기존의 DC-DC 컨버터가 갖는 손실을 최소화 하여 높은 효율을 달성하는 DC-DC 컨버터의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 고정 시비율로 동작하는 LLC 공진형 컨버터를 이용한 2kW급 연료전지용 양방향 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 양방향으로 동작하며, 에너지 저장 및 재사용을 목적으로 하고, 출력은 24V 배터리가 된다. Full-Bridge Topology를 이용한 LLC 공진 컨버터 앞단에 Buck 컨버터(Step-Down)를 연계하여 2-stage로 구성된다. 이는 기존에 1-stage로 구성된 회로의 스트레스를 두 개의 회로로 분담할 수 있기 때문에 효율 상승에 기여할 수 있고 출력제어를 간단한 회로구성으로 할 수 있다. LLC 컨버터부는 변압기의 기생

성분인 Leakage 인덕턴스를 사용하기 때문에 Section-type의 변압기 제작이 요구 되고 변압기 앞단에 공진 캐패시터를 연결하여 사인과 형태로 에너지를 전달하기 때문에 변압기 2차측에 인덕터를 제거하여 간단한 구성을 가진다. 또한 LLC 컨버터 부분은 고정 시비율로써 동작되기 때문에 간단한 Controller 구성을 가지며, DSP(Digital Signal Processor)의 적용으로 Buck 컨버터의 Duty제어를 통해 정전류 및 정전압 제어를 하여 컨버터의 디지털제어를 구현하였다. 본 논문에서 제안하고 제작된 컨버터는 여러 부하조건에서도 안정적으로 동작을 하며, 최대 부하전류에서 90% 이상의 높은 효율을 가질 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.^{[1][3]}

2. 연료전지용 2kW급 양방향 DC-DC 컨버터

그림 1 은 논문에서 제안한 회로의 전체적인 회로를 간단하게 나타낸 그림이고, 그림 2는 블록도이다. 회로는 2-Stage로 설계되었고 Buck Converter와 LLC Full-Bridge 공진 컨버터의 조합으로 구성된다. 회로의 입력은 DC 76~106V이고, 이는 2kW 용량의 Fuel Cell의 출력 전압범위이기도 하다. 연료전지의 출력을 강압시켜 배터리(24V)에 저장하는 것을 목적으로 하기 때문에 1차적으로 연료전지의 출력전압은 Buck 컨버터를 통해 56V정도로 강압된다. Buck 컨버터를 통해 56V로 강압된 전압은 LLC Full-Bridge 공진컨버터의 Transformer Turn Ratio에 의해 최종적으로 24V의 전압이 나오도록 설계하였다.

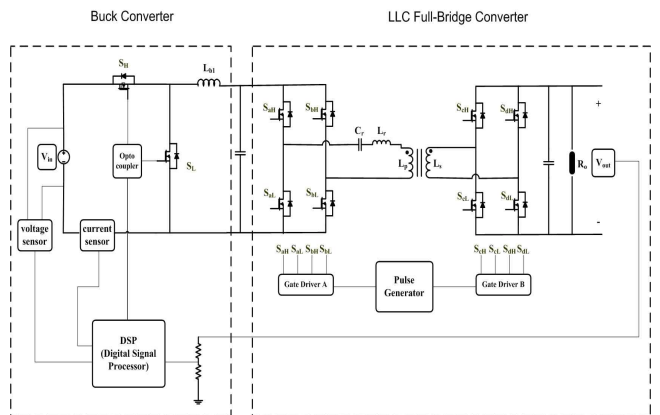


그림 1 제안한 2단 방식의 양방향 컨버터
Fig. 1 Proposed 2-Stage Bidirectional Converter

출력전압의 제어는 Buck컨버터의 Duty를 조절하여 제어하게 되고 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 컨버터의 Digital 제어를 구현하였다. 컨버터의 입력에 전류센서와 전압센서를 적용하여 DSP에서 입, 출력 전압, 전류를 검출하였으며, 이로써 정전압제어 및 정 전류제어가 가능하도록 하였다.

LLC Full-Bridge 공진 컨버터는 입력 56V 출력 24V로 고정되기 때문에 Duty와 주파수의 변동이 없는 고정 시비율로 동작하게 되고, 최적의 회로설계가 가능하며, 제어회로의 구조가 매우 간단해 진다. 회로를 2-Stage로 설계한 이유는 제어설계의 복잡성을 줄이고 회로가 갖는 스트레스를 분담하여 보다 높은 효율을 가지기 위해서이다.

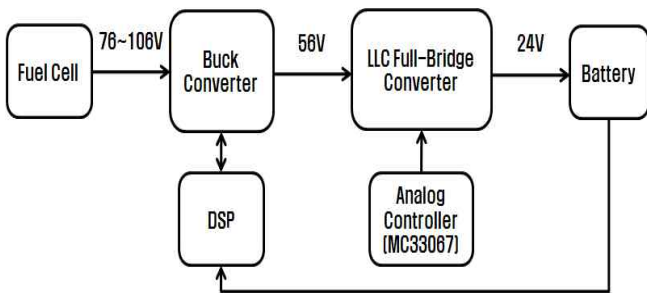


그림 2 시스템 블록도
Fig. 2 System Block Diagram

3. DSP를 이용한 디지털 제어 시스템 구성

3. 1 디지털 제어기 구현

TI(Texas Instruments)사의 TMS320F28335 프로세서를 중심으로 구성된 디지털 제어보드는 12bit A/D컨버터를 이용하여 전압, 전류 등을 검출하며, 주요 PI제어가 이루어지는 인터럽트 서비스 루틴(ISR : Interrupt Service Routin)에서 내부연산 함수를 이용하여 계산한 후 PWM 모듈을 이용하여 FET 게이트 신호를 생성한다. PWM 게이트 신호의 증가(Rising)와 감소(Falling)할 때에는 노이즈가 발생하므로 정확한 전압을 측정하기 위해 대칭 PWM의 최대값(Period)에서 샘플링 한다.

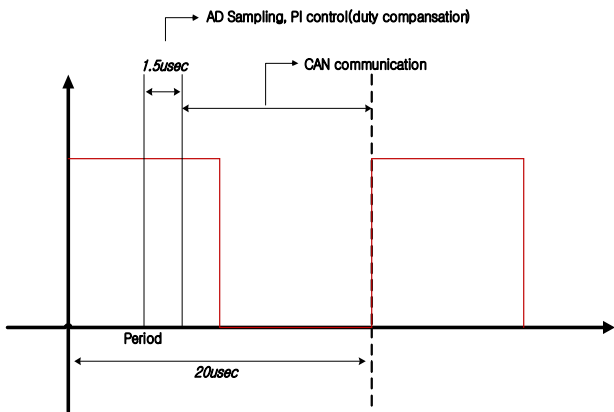


그림 3 노이즈의 영향을 최소화하기 위한 최적의 샘플링 시점
Fig. 3 System Block Diagram

3. 2 PI 제어기 설계

다음 그림 4는 전향보상 전압제어 블록 다이어그램 이다.

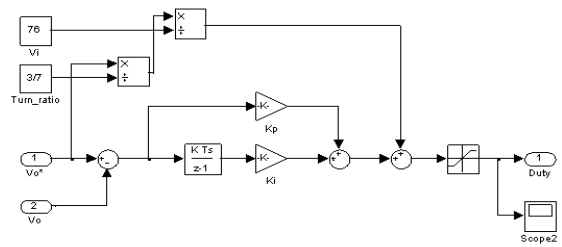


그림 4 전향보상 전압제어 블록 다이어그램
Fig. 4 System Block Diagram

$$duty = \frac{Vo \times (\frac{1}{S})}{Vi} + (Vo^* - Vo) \left(Kp + \frac{Ki}{S} \right) \quad (1)$$

제어기는 일반적인 전향 PI제어기로서 위의 식($Vo^* - Vo$)의 값이 0이 될 때, 즉 Error이 0이 되면 전향치 $\frac{Vo \times (\frac{1}{S})}{Vi}$ 로써 0.74의 듀티를 출력하며, 반대로 에러치가 존재하면 전향치와 에러에 대한 PI값이 더해진 듀티가 최종출력 된다. 또한 Buck의 안전한 동작을 위해 Saturation블록을 이용하여 듀티를 0.8로 제한한다. Vo^* 은 최종 출력전압인 24[V]이므로 고정듀티비인 LLC컨버터의 권수비(Turn ratio)로 나눠 1번째 스테이지 출력전압인 56[V]를 계산한다.

$$Kp = 2 \cdot \omega \cdot C \quad (2)$$

$$Ki = \omega^2 \cdot C \quad (3)$$

위의 두 식을 통하여 비례이득(Proportional gain)과 적분이득(Integral gain)을 구하여 C code 화 한다.

3. 3 모니터링 및 지령 시스템의 구현

디지털 제어보드가 측정한 입출력 전압, 전류를 모니터링하고, 제어하고자 하는 전압 및 전류 레퍼런스 지령을 실시간으로 내릴 수 있다. 모니터링 패넬은 NI(National Instruments)사의 Labview를 이용하였으며, 통신은 자동차 통신으로 알려진 CAN(Controller Area Network)으로 구현하였다.

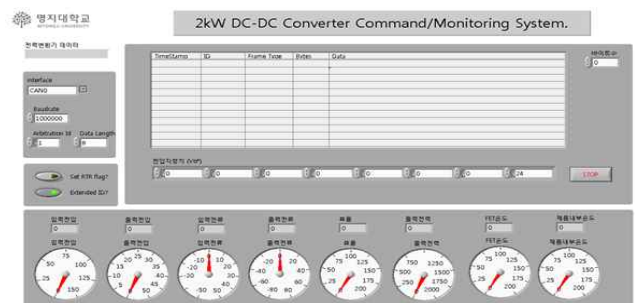


그림 5 LabVIEW를 이용한 모니터링 시스템 패넬구성
Fig. 5 System Block Diagram

위 그림의 각 게이지(Gage)는 전력변환기의 측정 변수를 보여주는 모니터링에 해당하며, 그림의 전압 지령치(Vo^*) 또는 전류 지령치(Io^*)를 입력함으로써 지령을 전달한다. 지령입력자는 사람 또는 중앙컴퓨터 등의 상위제어기가 될 수도 있다.

4. 실험 결과

앞서 구성한 내용을 바탕으로 컨버터와 제어 시스템을 제작하였으며, 실험을 통해 제안된 컨버터의 유효성을 검증하였다.

표 1 회로 실험사항

Table 1 Experiment specification

입력 전압 (V_i)	76~106 V_{dc}
출력 전압 (V_o)	24 V_{dc}
출력 전류 (I_o)	83.3 A
최대 출력 전력	2000 W
Buck 컨버터 동작 주파수	50 kHz
LLC 공진 컨버터 동작 주파수	80~100 kHz

표 2 회로 설계사항

Table 2 Design specification

인버터 사양		트랜스포머 사양		Core 형상
L	15.12uH	Turn Ratio	2.33:1(7:3)	
Core	PQ4040/PL7	Core	PQ4040/PL7	
Turn	10 Turn * 4	Lp(Lleakage)	76.4uH(2.65uH)	
Wire	0.1*300mm	Ls(Lleakage)	14uH(0.4uH)	
Gap	1.67mm	Gap	0.1mm	

그림 6은 설계한 내용을 바탕으로 실제 제작된 연료전지용 컨버터 사진이다. 실제 크기는 385*130mm이며, Buck + LLC의 2단 구성을 가진다. 2kW 용량으로 설계하였기 때문에 전류가 많이 흐르는 부분의 패턴을 고려하여 설계하였고, 권선에 흐르는 전류를 고려하여 LLC 부분의 변압기는 한 쌍의 병렬 구조로 구성하였다. LLC 컨버터 부분은 공진전용 IC인 MC33067을 사용하여 제어기를 구성하였고, 고정 시비율로써 별도의 제어가 필요하지 않기 때문에 회로구성이 간단해진다. 컨버터 전체의 제어는 TMS320F28335를 이용한 DSP를 통한 Buck 컨버터의 Duty제어에 의해 이루어진다.

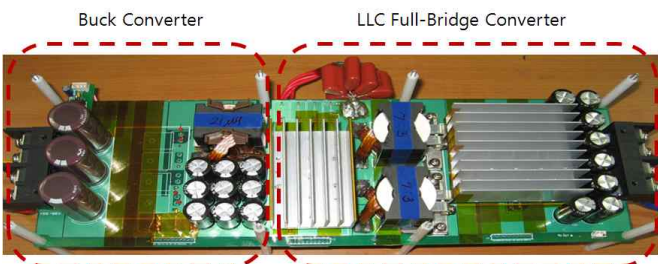


그림 6 연료전지용 2단 구성 DC-DC 컨버터
Fig. 6 2-Stage DC-DC Converter for Fuel-cell

다음 그림(7~9)들은 각각 입력 76V, 1.5kW load시 컨버터의 출력전압, 출력전류파형과 LLC 컨버터의 스위치 drain-source간의 전압파형 및 변압기 1차측에 흐르는 공진전류파형의 모습을 보여준다. LLC 컨버터의 스위칭 주파수는 100kHz이고, LC공진주파수 역시 100kHz정도로 고정하였다. ($L_r=1.32\mu H$, $C_r=3.29\mu F$) 공진주파수는 다음 식에 의해 계산된다.

$$f_r = 1/2\pi \sqrt{L_r C_r} \quad (4)$$

주파수와 소자 값을 변경함으로써 LLC 컨버터에서의 최적의 공진 포인트를 맞추었고, ZVS(Zero Voltage Switching)영역에서 동작시켜 스위칭손실을 최소화 하였다.

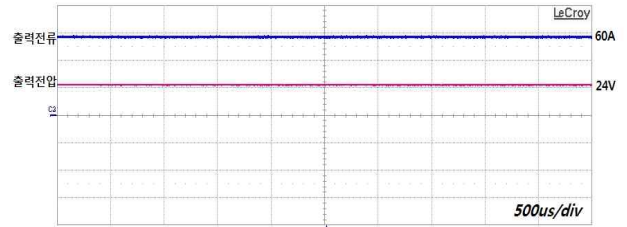


그림 7 입력 76V 1.5kW 시 출력 전압, 전류
Fig. 7 Output Voltage and Current (Input 76V, 1.5kW)

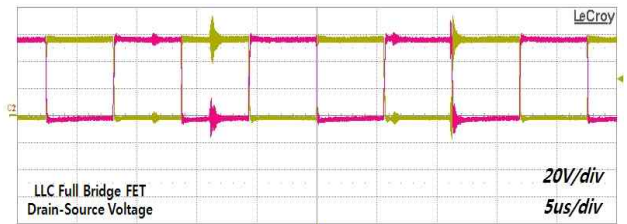


그림 8 입력 76V 1.5kW 시 LLC 컨버터의 Vds 파형
Fig. 8 Vds pulse of LLC converter (Input 76V, 1.5kW)

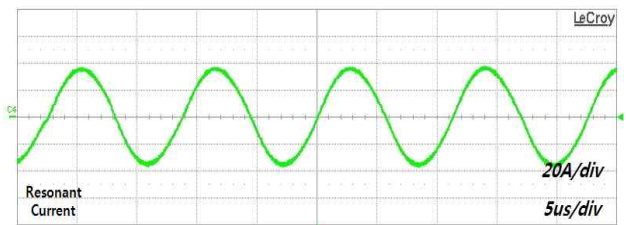


그림 9 입력 76V 1.5kW 시 LLC 컨버터의 공진전류(Ir) 파형
Fig. 9 Resonant current of LLC converter (Input 76V, 1.5kW)

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 Buck 컨버터와 LLC Full-Bridge 컨버터를 이용한 2단 구성의 연료전지용 양방향 컨버터 시스템을 구성하였다. LLC 공진 컨버터를 이용하여 스위칭 손실을 최소화 시켜 약 2kW의 부하에서 90%이상의 효율을 얻었고, 양방향 동작이 가능한 구조로 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 DSP를 이용한 컨버터의 디지털 제어기 적용과 Labview를 이용한 모니터링 시스템의 구현으로 좀 더 발전된 전력변환 시스템을 구성하였다.

참고 문헌

- [1] Bo Yang and Fred C. Lee. "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion" APEC2002, pp.1108-1112 vol.2
- [2] 오은태, 윤수영, 이윤재, 유광민, 채형준, 한병문, 이준영 "연료전지 계통 연계형 고효율 DC-DC 컨버터", 대한전기학회 논문집, 게재예정, 2009.
- [3] Robert L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies" IEEE Transactions on power electronics, Vol 3, No.2, April 1988, pp174-182