

연료전지용 전력변환장치의 DC-DC 컨버터 개발

권형남, 정홍주, 김래영, 최태식, 송중환
(주)효성 중공업 연구소

Development of DC-DC converter for the fuel cell system

H.N. kwon, H.J. Jung, R.Y. Kim, T.S. choi, J.H. song
hyosung corporation

ABSTRACT

오늘날 청정에너지 중에서 많은 주목받고 있는 것으로 연료전지를 들 수 있다. 그러나 연료전지의 경우 저전압 대전류의 특성으로 인하여 상용전원에 전원을 공급하기 위해서는 승압 및 상용주파수로 변환해야 하는 중간 과정을 거쳐야 한다. 이러한 과정의 하나인 승압을 위해서는 일반적으로 고효율의 DC-DC 컨버터가 많이 이용된다. 따라서 본 논문에서는 당사에서 제작한 고효율의 DC-DC 컨버터에 대해서 서술하고자 한다.

1. 서 론

현재 전력산업 분야에서는 산업화의 발전과 더불어 전력수요의 갑작스러운 증가와 전세계적인 지구온난화 문제를 해결하기 위해서 환경 친화적인 새로운 발전방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 새로운 발전방식 중 비교적 용량이 작은 소규모의 발전설비는 태양광발전, 풍력발전, 연료전지 등이 있다. 특히 연료전지 발전시스템에서는 연료전지로부터 생성된 전력을 전력계통에 안정하게 주입하기 위한 컨버터 및 인버터 전력변환장치가 반드시 필요하게 된다. 그러나 연료전지 발전방식의 경우 소용량은 Cell의 적층수가 비교적 작아 저전압 대전류 특성을 지닌다. 이러한 연료전지 발전시스템은 계통연계 또는 독립운전으로 동작할 수가 있어야 한다. 그러나 계통연계 또는 독립운전으로 동작을 하는 경우 상용 전압을 만들어야 하나 연료전지의 저전압의 특성에 의하여 낮은 전압에서의 계통의 전압을 만들어 줄 수가 없으므로 전압의 상승을 요구하고 하며, 전력변환의 효율을 높이기 위한 승압형 컨버터의 개발을 필요로 하고 있다. 연료전지의 효율의 상승을 위해 승압형 full bridge DC-DC 컨버터의 설계 및 제작, 실험을 하였다.

2. 시스템 구성

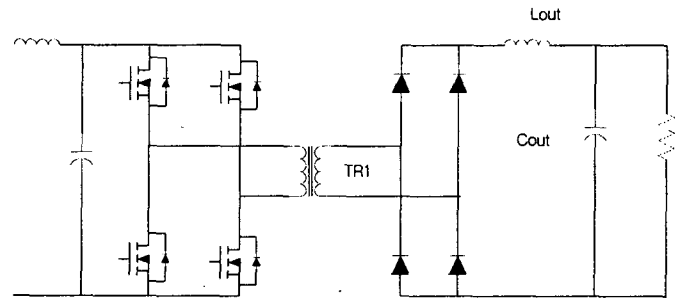


그림1. 전체 시스템

그림 1에서 보여주는 대용량 직류 전원 장치에 많이 쓰이는 full-bridge DC-DC 컨버터를 사용하였으며, 2차측은 전파 정류회로를 사용하였다.

2.1 스위칭 소자의 선택

그림 2는 1주기 동안의 스위치가 ON, OFF시의 전압, 전류파형을 나타내고 있으며 스위치의 손실은 ON, OFF시의 전압과 전류가 중첩이 되는 부분과, 도통시의 도통저항으로 인한 손실이 있다. 대전류의 특성에 의하여 스위치의 도통저항에 의하여 손실이 많으므로 도통저항이 작은 소자를 선정하여 한다.

$$P_T = P_{ON} + P_S + P_{OFF} \quad (1)$$

$$P_T = P_{SON} + P_{SOFF} \quad (2)$$

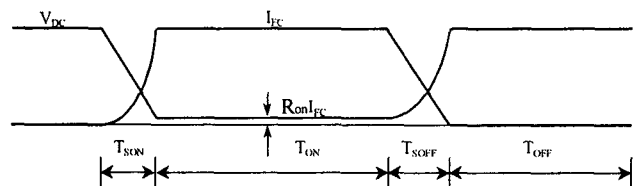


그림2. 스위칭 1주기 파형

여기서 P_{ON} : 도통손실(on-state loss)
 P_{OFF} : 차단손실(off-state loss)
 P_S : 스위칭손실(switching loss)
 P_{SOFF} : turn-off시 스위칭손실
 P_{SON} : turn-on시 스위칭손

차단 손실은 무시할 수 있으므로 전손실 P_T 는 다음과 같이 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_T &= P_{ON} + P_S + P_{OFF} \quad (3) \\
 &= (V_{sa} I_{FC} T_{ON} + V_{DC} I_{FC} T_{SON} W_{ON} \\
 &\quad + V_{DC} I_{FC} T_{SOFF} W_{OFF}) f \\
 &= (V_{sa} I_{FC} \frac{T_{ON}}{T} + V_{DC} I_{FC} W_{ON} \frac{T_{SON}}{T} \\
 &\quad + V_{DC} I_{FC} W_{OFF} \frac{T_{SOFF}}{T}) \\
 &= I_{FC}^2 R_{ON} \frac{T_{ON}}{T} + V_{DC} I_{FC} W_{ON} \frac{T_{SON}}{T} \\
 &\quad + V_{DC} I_{FC} W_{OFF} \frac{T_{OFF}}{T}
 \end{aligned}$$

여기서

V_{sa} : 스위치소자가 도통되었을 때 포화전압
 W_{ON} : turn-on시 스너버회로 등에 의한 파형정형을 고려한 weighting factor ($0 \sim 1/2$)
 W_{OFF} : turn-off시 스너버회로 등에 의한 파형정형을 고려한 weighting factor ($0 \sim 1/2$)
 f : 스위칭 주파수 $\frac{1}{T}$
 R_{ON} : MOSFET의 ON저항

DC-DC 컨버터의 효율의 향상을 위하여, 소자의 선정은 식 (3)에 의하여 R_{ON} 의 저항의 값이 $6.4m\Omega$ 보다 작은 값을 가지는 MOSFET의 소자로 IXYS사의 IXYS150N50의 소자를 병렬로 연결하였다.

2.2 고주파 변압기

DC-DC 컨버터 변압기 1차측 전압과 자속밀도의 변화는 그림과 같이 나타낼 수 있다.

고주파 변압기를 설계하는 기본이 되는 Faraday의 유도기전력의 식은 다음과 같다.

$$E = N \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot A_f \cdot \frac{dB}{dt} = N \cdot A_f \frac{\Delta B}{\Delta T} \quad (4)$$

여기서 A_f : 코어의 단면적, ΔB : 자속의 변화량
 N 권선수

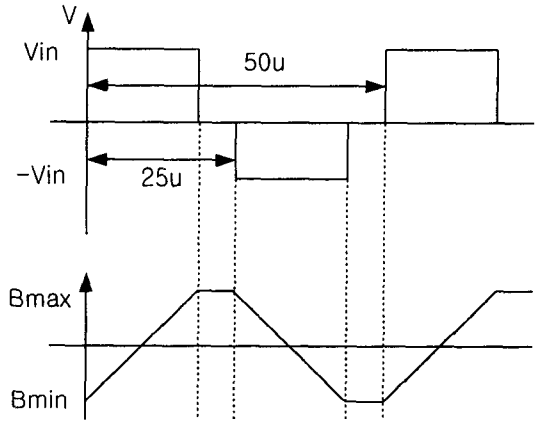


그림 3 입력전압과 자속의 변화

다음의 식을 정리하면,

$$N \cdot A_f = \frac{E \times \Delta T}{\Delta B} \quad (5)$$

식 (5)에서 코어에 감을 수 있는 턴수와 코어의 단면적의 값과 실제 권선의 턴수와 코어의 단면적의 비교로 코어의 크기를 선정하며, 1차 권선의 단면적은 1차측에 흐르는 최대의 전류를 전류밀도로 나누어 선정하며 고주파 전류로 인하여 표피효과가 발생하므로 전선의 지름에 제한을 가지게 된다. 표피효과에 의한 두께는 다음의 식에 의하여 선정이 된 Litz wire를 사용하였다.

$$\Delta = \frac{66}{\sqrt{f}} \quad (6)$$

여기서 Δ : 침투깊이 (mm)
 f : 스위칭 주파수

1차에 감을 턴 수의 결정은 식(7)에 의하여 결정한다.

$$N = \frac{E \cdot \Delta T}{\Delta B \cdot A_f} \quad (7)$$

2차에 감을 권선 수는 1차와 2차의 전압의 비에 의해 결정 된다. 2차측의 전압의 비는 듀티의 비와 다이오드와 변압기에 의한 전압의 강하와 스위치소자에 의한 전압의 강하를 모두 고려하여 2차측의 전압을 선정하여야 하므로 시스템의 전체적인 전압의 비는 모두 고려하여 10%의 전압의 여유를 주게 하였다. 변압기는 코어 PC40 EC90Z를 선택을 하였으며, 턴수와 전압의 여유분을 고려하여 턴수의 비는 1 : 12.5로 설정이 되었다. 식 (7)에 의하여 1차측의 턴수는 3턴이며, 2차측의 턴수는 38턴으로 설정을 하였으며, 코일은 Litz wire를 사용하였다.

2.3 인덕터의 설계

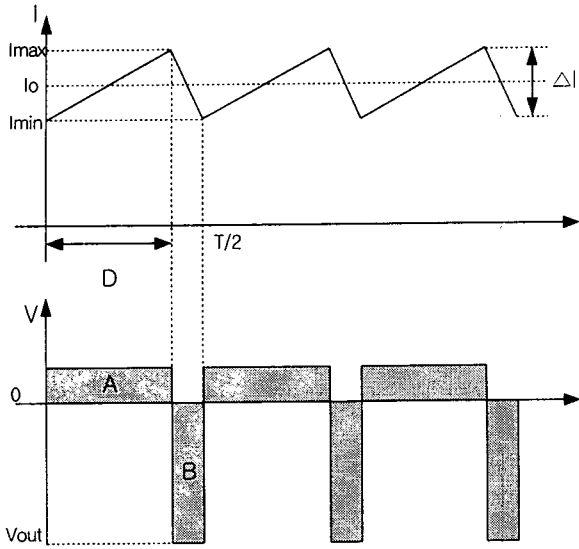


그림 4 인덕터에 흐르는 전류와 전압

인덕터를 설계하기 위해서 먼저 인덕터에 흐르는 전류의 허용리플 전류를 결정한 후 인덕터의 값을 계산한다. 인덕터에 인가되는 전압은 스위치가 켜졌을 경우에는 입력전압과 출력전압의 전압의 차이에 의하여 전압이 인가되나 스위치가 꺼졌을 경우에는 인덕터에 출력 전압 모두가 인가가 된다.

즉, 다음의 전압의 방정식으로부터 인덕터를 설정한다.

$$L = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta I} = \frac{V_{out} \times (T/2 - D)}{\Delta I} \quad (8)$$

인덕터의 값이 선정이 된 후 턴수는

$$N = \frac{LI}{\Phi} = \frac{LI}{BA} \quad (9)$$

여기서 L : 인덕터 I : 출력전류
B : 자속밀도, A:코어의 단면적

인덕터가 공극이 없는 경우는 코어의 자속의 포화가 이루어져서 인덕터의 역할을 하지 못하고 단락의 현상과 같은 역할을 한다. 자속의 포화가 이루어지지 않게 하기 위하여 공극을 넣어야 한다. 공극의 길이는 다음의 식에 의하여 넣게 된다.

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2}{l_g/u_0A} = \frac{u_0AN^2}{l_g} \quad (10)$$

식에 의하여

$$l_g = \frac{N^2 \cdot A \cdot u_0}{L} \quad (11)$$

여기서 l_g : 공극의 길이, u_0 : 공기 투자율,

A : 코어의 단면적 R : 자계 리액턴스

공극을 삽입해야 한다.

출력전류의 리플을 10%로 하여 식(8)의 인덕터의 계산은 8mH이며, 턴수의 계산은 식 (9)에 의하여 187턴을 감아 사용하였다. 공극은 2mm로 하였다.

3. 실험

토폴로지의 구성과 소자의 선택된 것으로 시스템을 구성을 한 것을 그림 6에서 보여주고 있다. 1.5kW의 용량을 가지며, 입력 전압 12V, 출력전압 400V이며, 스위칭 주파수는 20kHz의 동작을 한다. MOSFET은 소자의 선정에서와 같이 IXYS150N15의 소자를 병렬로 연결을 하였으며, 변압기는 변압의 비를 1 : 12.5의 변압의 비로 선정을 하였으며, 인덕터의 값은 8mH의 값을 가지며, 다이오드는 DSEI120-12를 선정하여 실험을 하였다.

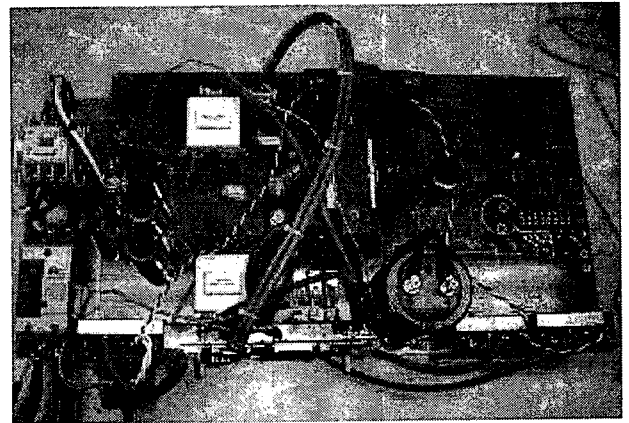


그림 5 실제 시스템

그림 6은 시스템의 전체회로도에서 변압기 1차측의 전압, 전류의 파형의 파형을 보여 주고 있으며 1차측의 전압이 스위치가 켜질 경우 스위치의 기생 커패시턴스와 변압기의 누설 인덕턴스에 의한 전압의 상승을 볼 수가 있으며 전류는 스위치가 on시에 2차측의 전류의 상승의 비에 의한 값으로 상승하고 있음을 보고 있다.

그림 7은 변압기 1차측 전압과 출력 인덕터의 전류의 파형으로 스위치가 on시 입력 전압이 인가가 될 경우 전류의 상승을 보여 주고 있으며 스위치가 OFF시에는 인덕터의 전류가 감소함을 보여 주고 있다. 또한 설계치의 전류의 리플 0.75A 보다 조금 큰 1A의 전류의 리플을 보여 주고 있다.

그림 8을 출력 전압, 전류의 파형을 보여주고 있다. 출력전압과 전류는 400V, 3.2A가 일정하게 유지 함을 보여 주고 있다.

4. 결 론

연료전지의 저전압 대전류의 특성의 효율 상승을 위하여 전압을 높이기 위하여 Full bridge 방식의 DC-DC 컨버터를 선택 하였다. 주파수와 전압, 전류를 고려하여 인덕터와 고주파 변압기를 설계, 제작하였으며, 이를 설치하여 실험을 하였다. 실험은 2차측의 다이오드에 인가되는 전압이 예상 하였던 것보다 많은 전압이 인가되어 다이오드의 보호가 필요하게 되어 스너버 커패시터를 달아 보호를 하였다. 전체적인 dc-dc 컨버터의 효율은 92%를 가진다.^[4]

참 고 문 헌

- [1] A.Monti, E. Santi, F.Ponci, D.Franzoni, " Fuel Cell Based Domestic Power Supply - A Student Project", PESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 1, 2002 pp. 315-320, vol.1.
- [2] F. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Pconci and N.Barry, "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply", IEEE APEC 2002, Dallas, Texas, pp. 605-613, March 10-14, 2002.
- [3] A. M. Tuckey, J. N. Krese, " A Low-Cost Inverter for Domestic Fuel Cell Applications", PESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 1, 2002 pp. 339-346 vol.1.

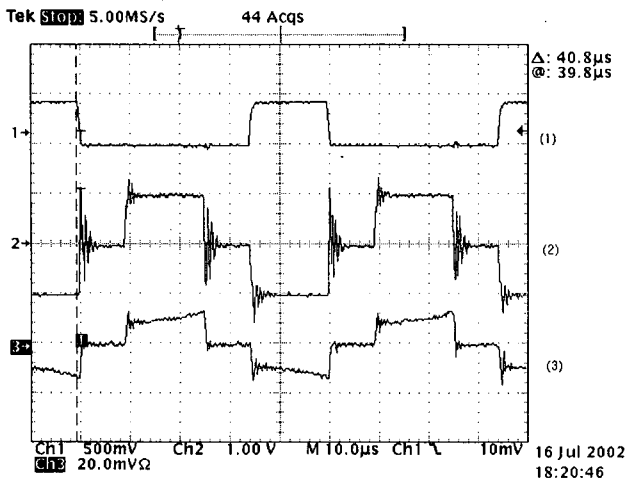


그림 6 (1)스위치 파형, (2) 변압기 1차측 전압
(3) 변압기 1차측전류

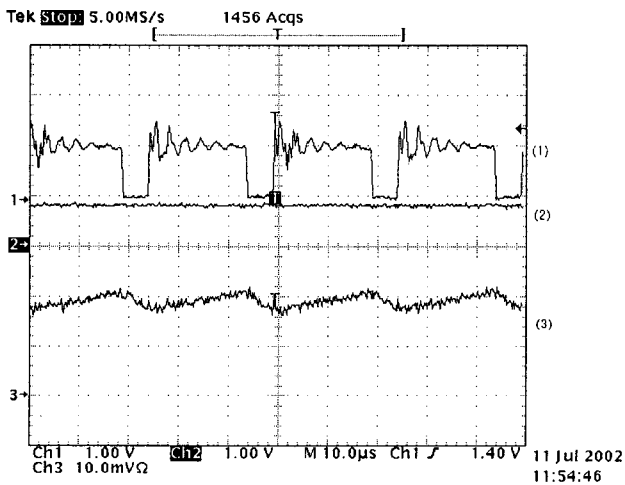


그림 7 (1) 인덕터 입력 전압, (2) 출력 전압, (3)인덕터 전류

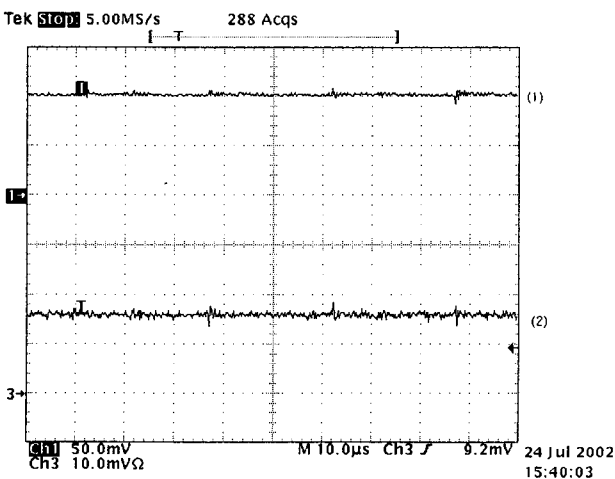


그림 8 (1) 출력 전압, (2) 출력 전류