

소출력 연료전지 발전용 booster 연구

한 수빈^o 정 봉만 신 동열 최 수현
한국동력자원연구소

A study on the booster for a small-capacity fuel cell power generator.

Soo-bin Han^o Bong-man Jung Dong-ryul Shin Soo-hyun Choi
Korea Institute of Energy and Resources

Abstract

Modelling and simulation of booster which is used as step-up DC/DC converter for small scale fuel cell generator is studied. And 2 kW booster based on this result is designed.

Especially, booster efficiency related with fuel cell and control characteristics are analyzed and a 2 kW booster is experimented in various operating condition. As a result, power conversion efficiency is above 74% throughout the whole operating range.

연료전지 발전은 연료가 가지고 있는 수소성분의 화학에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변환하는 발전방식으로 기존의 발전방식에 비해 고효율, 무공해, 경량, 작은 소요부지, 용량 결정의 유연성 및 빠른 부하 응답특성 등 많은 장점을 갖고 있다.

연료전지발전의 중심이 되는 본체는(Stack) 단위전지(Single Cell)라 하는 하나의 양극과 음극으로 구성된 전지를 적정수 연결하여 필요한 전력을 생산하게 되며, 이때 발전되는 전기는 직류이다.

연료전지의 발전특성으로 단위 연료전지의 발전전압이 매우 낮고(인산형의 경우 개방전압 1.2[V]미만, 정격전압 0.6-0.7 [V]), 전류밀도는 상대적으로 매우 높아(120[mA/cm²] 정도) 수 kW급 소출력발전기의 경우 큰 전압변동율을 갖는 저전압, 대전류의 DC 전압원이라 할 수 있다. 따라서 상용 AC전환을 얻기 위해서는 DC/AC변환뿐 만 아니라 전압조정과 승압이 요구된다.

DC/AC변환은 기존의 인버터기술을 사용하며, 승압은 인버터에서 AC 승압으로 또는 초퍼에서의 DC 승압으로 모두 가능하나 현재 연구된 결과는 변환효율 향상을 위해 대부분 별도의 승압 DC/DC 변환장치를 이용하고 있다.

승압 DC/DC 변환방법중 인버터와 승압 변압기를 이용하여 AC 증폭한 후 다시 정류하여 DC승압을 하는 방법⁽¹⁾, 다상booster를 사용한 DC승압방식⁽²⁾은 각기 고유한 장점과 용도가 있으나, 많은 반도체 스위치소자를 사용하게 되어 제조가격이 비싸지고 회로가 복잡하며 손실이 큰 단점이 있다.

연료전지 발전시스템의 고효율운전을 위해서는 가능한 한 전력변환장치에서의 손실을 줄여야 하며, 그런 의미에서 사용하

는 소자수가 적어 손실요인이 적은 Booster가 당연히 DC 승압 수단으로서 선택될 수밖에 없다. 실제 선진국에서 개발된 연료전지를 전력변환장치는 40[Kw]이상의 경우 승압용 Booster를 사용하여 90[%] 이상의 효율을 얻고있다.^(3,4)

본 연구에서는 연료전지와 관련하여 Booster의 효율특성을 분석하고, 2[Kw]급 Booster를 제작하여 여러 조건에서의 효율 변화특성을 실험하였고, Booster의 전압 조절특성을 digital PI 제어를 사용하여 실험하여 DC 승압장치로서의 특성을 분석하였다.

2. 소출력발전에서의 연료전지와 Booster효율

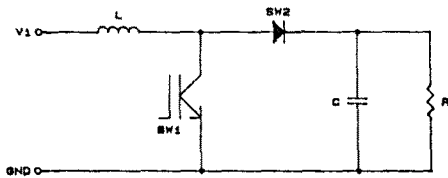
연료전지스택은 전력변환장치측면에서는 일종의 에너지를 저장하고 있는 단위전지의 집합으로 볼수있다. 단위전지는 정격에서 약 0.7[V]이고 이때 전지의 전류밀도와 면적에 따라 결정되는 전류 I [A]가 출력된다면 $P=0.7I$ [W]의 단위에너지 저장량을 갖고 발전에서 사용하는 스택이 N개의 단위전지의 직렬로 구성되는 경우 스택의 전에너지 저장량은 $P_s=N*P$ [W]이고 전압은 0.7*N[V], 전류는 I [A]로 단위전지의 전류와 동일하다. 즉 단위전지를 직렬로 쌓아서 전지스택을 만들기 때문에 연료전지발전에서는 발전용량에 관계없이 정격 전류는 일정하게 되며 따라서 Booster의 Ohmic Loss도 발전용량에 관계없이 일정하며 이것은 결국 발전용량이 커질수록 Booster의 효율은 좋아진다는 것과 목표로 하는 출력 DC전압이 같은경우는 Booster의 용량은 연료전지 스택용량에 관계없이 일정하다는 것을 의미한다. 따라서 소출력연료전지 발전일수록 Booster의 효율은 크게 떨어지므로 특별히 제작시 주의를 요한다.

본 연구에서는 사용될 전지스택은 2.5[Kw]급으로 동작시 전압변동범위는 20[V]-40[V]이고 전류는 20[V]시 125[A]이므로 상용 교류전압을 얻기 위해서는 Booster의 전압이득은 6 이상 요구되나 효율문제와 함께 다음 절에서 분석된 바와 같이 실제적으로 전압승압에 한계가 있으므로 이득을 3 이하로 하였고 필요한 전압이득은 인버터에서 달성하는 방법을 사용하였다.

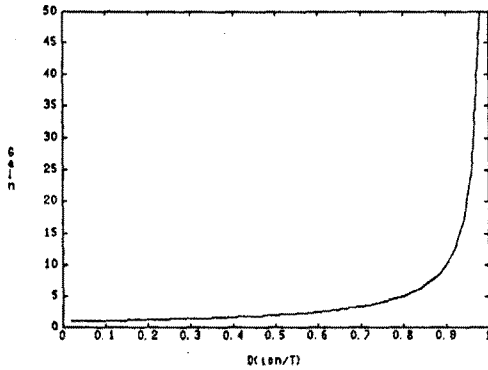
3. Booster modelling과 동작 특성

(1). 이상적인 Booster 특성

Booster는 [그림 1]와 같은 구조로 Stray 성분이 존재하지



[그림 1] booster의 구조



[그림 2] 이상적인 booster에서의 전압이득 특성

않고 스위치소자특성이 이상적인 경우 [그림 2]와 같이 스위치 SW1의 스위칭 Duty ratio에 비례하여 전압이득(gain)이 계속 증가하나 실제 회로에서는 여러 Stray성분이 존재하며 스위치 소자의 내부저항등이 존재하므로 전압이득값은 한계가 있다.

(2) Booster의 동작 Modelling

실제 Booster는 인덕터, 캐패시터, 스위치소자의 내부저항등과 Stray성분이 존재하므로 [그림 3-a]와 같이 모델링할수 있다. 동작 모드는 [그림 3-b]와 같이 SW1이 도통되고 SW2가 개방되어 입력전류가 증가되고 출력캐패시터의 전압이 부하로 방전되는 모드1과 [그림 3-c]와 같이 SW1이 개방되고 SW2가 도통되어 입력에너지가 출력으로 전달되어 출력 캐패시터 전압을 충전시키는 모드2로 구분할수 있으며 인덕터의 전류 i_L 과 캐패시터 전압 v_C 를 상태변수로 하여 각 모드의 상태방정식을 구해보면 다음과 같다.

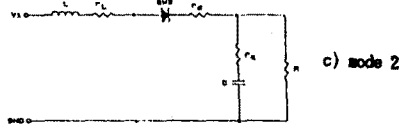
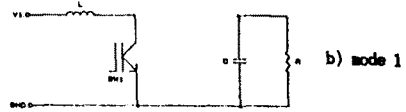
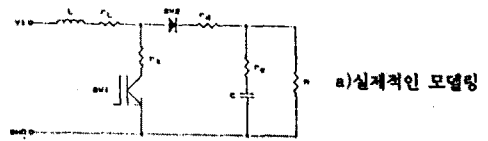
a) Mode 1인 경우

$$\begin{bmatrix} di_L/dt \\ dv_C/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_L + r_c)/L & 0 \\ 0 & -1/c/(r_c + R) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$

$$v_o = \begin{bmatrix} 0 & R/(R+r_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

b) Mode 2인 경우

$$\begin{bmatrix} di_L/dt \\ dv_C/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_L + r_d + r_c * R / (R+r_c)) / L & -R/L / (r_c + R) \\ R/c / (r_c + R) & 1/c / (r_c + R) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$



[그림 3] 실제적인 booster회로 모델과 동작 모드

$$v_o = [r_c * R / (r_c + R) \quad R / (r_c + R)] \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

이상의 상태방정식에서 부터 State space averaging에 의한⁽⁵⁾ 방법을 사용하여 DC gain과 AC transfer function을 구한 결과는 다음과 같다.

DC gain G_{dc}

$$G_{dc} = v_o/v_i = G_{ideal} * (1-D) * R * (R-r_c) / (R+r_c) * R'$$

AC transfer function $G(s)$

$$G_{ac} = \frac{(1-D)R/R' (1+s*r_c*C)}{s^2 LC(R+r_c)/R' + s(L/R' + (RR_L + r_c R_L + (1-D)Rr_c)/R') + 1}$$

Control transfer function $G_d(s)$

$$G_d(s) = v_o(s)/D(s) = [v_o/(1-D)/R'] * [((D'R')^2 / (R+r_c) - R_L)] * \frac{(1+r_c)(1-sL/((1-D)^2 R^2 / (R+r_c) - R_L))}{s^2 LC(R+r_c)/R' + s(L/R' + (RR_L + r_c R_L + (1-D)Rr_c)/R') + 1}$$

$$G_{ideal} = 1/(1-D)$$

$$D = T_{on}/T \quad D' = 1-D$$

$$R' = r_L + r_c * D + r_d(1-D) + R^2(1-D)^2 / (R+r_c)$$

$$R_L = r_L + r_c * D + r_d(1-D)$$

r_L : 인덕터 내부저항 r_c : 캐패시터 내부저항

r_s : sw1의 내부저항 r_d : sw2의 내부저항

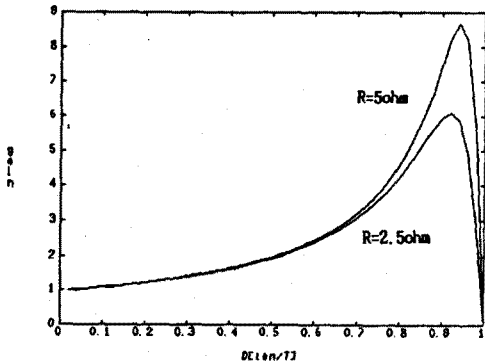
R : 부하저항

(3) Booster의 DC 이득 특성

모든 Stray성분을 고려한 DC 이득특성은 G_{dc} 에 의해 파악할 수 있다. 본 연구에서 실험된 Booster는 인덕터 내부저항 r_L 이 0.001[ohm], 캐패시터의 ESR이 0.012[ohm]이고 r_c 가 0.015[ohm], r_d 가 0.01[ohm]으로 DC 이득 특성은 [그림4]와 같다. 각 Stray성분을 최소화 시키고 내부저항이 적은 소자를 사용하는 것이 높은 이득의 Booster를 제작할수 있는 조건이며 전압이

득이 높아질수록 Booster의 효율은 감소하며 여러 제한요인 때문에 3배이하의 이득으로 동작하게 된다.

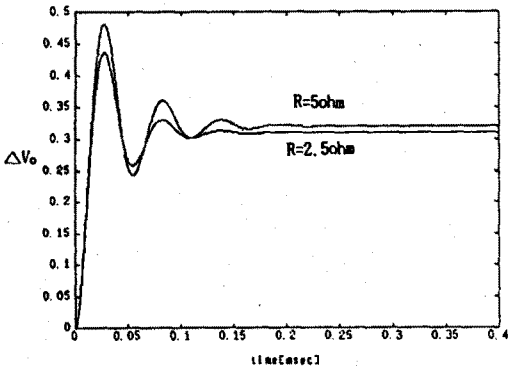
부하저항의 변화에 따른 DC이득의 변화는 부하가 커질수록 DC이득이 감소하며 이는 부하가 커짐에 따라 전류증가에 의해서 손실이 증가한다는 것을 의미한다.



[그림 4] booster의 DC이득 특성

(4) Booster의 AC 이득 특성

AC 이득특성은 G_{ac} 에 의해서 파악할 수 있다. 동일한 회로성분을 사용하고 $D=0.7$ 로 동작되고 있는 상태에서 입력전압의 10x step변화에 따른 출력전압의 변화는 [그림 5]와 같다. 즉 정상상태에서의 전압이득은 G_{dc} 와 같고 과도상태에서는 2차 전달함수 특성에 따라 감쇠진동한다.

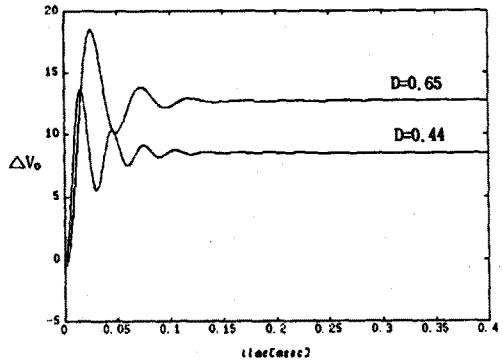


[그림 5] booster의 출력전압변동특성

(5) Booster 제어 특성

Booster의 출력은 인버터의 입력이 되므로 안정된 상용전압을 얻기 위해서는 연료전지의 전압변동 및 부하변동에 따라 출력 DC전압이 일정하게 유지되도록 제어해 주어야 한다. 제어되어야 하는 목표는 출력전압이며 이를 제어하는 수단은 Duty ratio D 가 된다. D 의 변화에 따른 출력전압의 변화는 $G_d(s)$ 에 의해서 파악할 수 있고 각종 stray성분외에 현재의 D 와 출력전압에도 영향받고 있음을 볼 수 있다. 특히 극과 영점이 D 의 변화에 따라 이동한다는 사실을 주의해야하며 이것은 제어기설계에 어려움을 주고 있다.

예로서 같은 Stray 성분에 대해 출력전압이 50[V]일때 $D=0.65$ 인 경우와 $D=0.44$ 인 경우 D 값의 10[%] step 변화에 대한 출력



[그림 6] booster에서 D변화에 따른 출력전압 변동특성

전압의 변화는 [그림 6]과 같이 과도상태의 특성이 변화하고 있음을 볼 수 있다.

4. 실험결과

Booster는 주전력소자로는 IGBT를 사용하였고 $L=500[\mu H]$, $C=11200[\mu F]$ 을 사용하여 제작하였고 10[KHz]의 스위칭 주파수로 동작시켰다. 제작된 Booster에 대해 입력전압 20[V]에서 40[V]의 동작변화에 목표전압 50[V]을 유지하기 위한 방법과 여러 조건에서의 효율변화에 대해서 실험하였다. 출력전압 제어는 PI제어로 하였고 전달함수의 영점과 극점이 회로동작에 따라 변동되므로 PI제어의 각 Parameter는 실험에 의한 try and error에 의해서 결정하였다.

1. 목표전압을 유지시키기 위한 실제 D 값의 변화

출력의 목표전압 50V를 유지시키기 위해서 이상적인 상태의 전압이득식을 사용하게 되면 실제 회로내에서 발생하는 손실 때문에 항상 목표전압보다 낮게 된다. 제작된 Booster의 경우 [그림 7]과 같이 입력전압이 낮을수록 그리고 부하가 커질수록 목표전압과 실제전압의 차이가 증가하는 것을 볼 수 있으며 이는 전류가 증가하게 되어 손실이 증가하는 것을 의미한다.

목표로 하는 출력전압을 유지시킬 수 있는 실제 전압이득은 [그림 8]과 같이 측정되었고 부하가 커질수록 입력전압이 낮아질수록 큰 전압이득이 필요한 것을 알 수 있다.

2. 시동시 과도상태변화

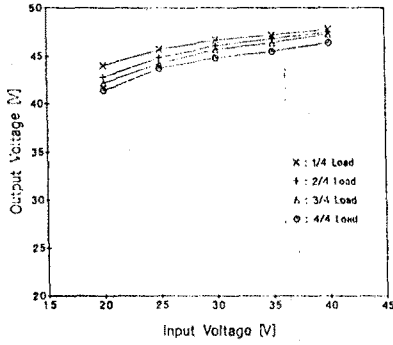
Booster의 처음 시동에서 부터 정상상태까지의 과도상태변화는 입력 25[V]에서 출력 50[V]일때 [그림 9]와 같고 정상상태까지 약 100[ms]정도가 요구된다.

3. 효율 측정

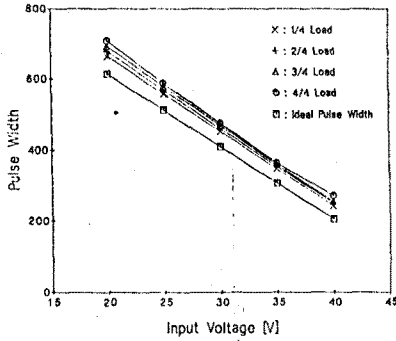
효율은 출력전력/입력전력으로 입력력 전류, 전압을 측정하여 계산하였다. 그 결과는 [그림 10]과 같다.

4. 제어 특성

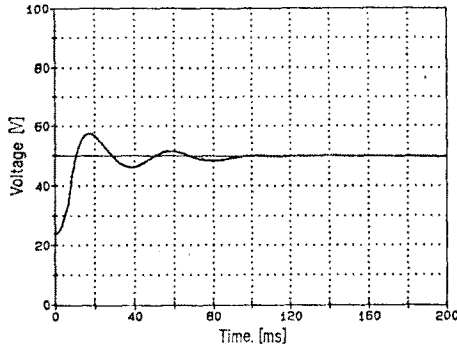
본 실험에서 출력전압조절을 위해서 사용한 제어방식은 PI 제어를 이용한 Feedback제어와 함께 큰 입력변화에 대해 보



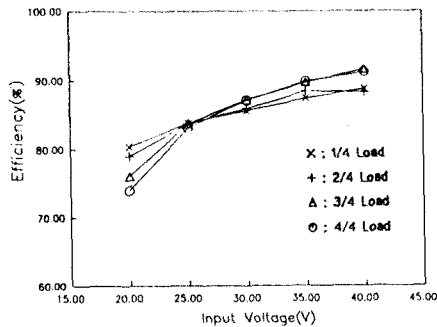
[그림 7] 이상적인 회로로 가정하였을때의 출력전압



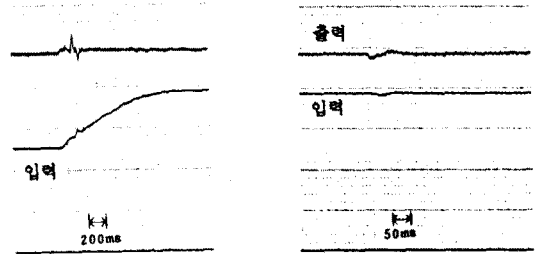
[그림 8] 목표전압을 유지시킬 수 있는 실제적인 펄스 폭



[그림 9] 시동시 출력전압의 상태변화



[그림 10] booster의 효율 특성



[그림 11] 입력전압 변동에 의한 출력전압 제어 특성

[그림 12] 부하변동에 따른 출력전압 제어 특성

다 빠른 응답을 위하여 Feedforward 제어를 병행하였다.

[그림 11]은 입력전압 변동에 대한 출력 전압 제어 특성을 보여주며 [그림 12]는 부하변동에 대한 출력전압 제어 특성을 보여주고 있다.

5. 결론 및 향후 연구

연료전지용 승압 초퍼로서 Booster는 사용자수가 적고 높은 효율을 얻을수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 제작된 2[Kw] 연료전지용 Booster는 넓은 동작영역에서 74[%]이상의 효율을 얻을수 있었고 도통손실이 보다 적은 소자의 사용시 80[%] 이상의 효율이 가능하다. Booster의 출력전압 제어는 일반적인 PI제어로 가능하지만 동특성을 임의로 조절하기 위해서는 해석적인 제어기설계가 필요하게 되나 Booster의 전달함수는 현 동작상태에 따라 전달함수특성이 변화하게 되므로 이를 보완하는 제어기 연구가 필요하다.

향후 Booster와 인버터의 결합된 연료전지용 전력변환장치의 종합효율을 70[%]를 목표로 연구를 추진할 계획이다.

6. 참고문헌

1. 김 준석의, "연료전지 발전시스템에서의 승압형 DC/DC 변환기의 설계", 춘계전력전자 연구회 학술발표논문집, pp110-113, 1991
2. 김 영록의, "4상 IGBT CHOPPER", 춘계 전력전자연구회 학술발표논문집, pp40-43, 1991
3. 40kW Fuel Cell Power Plant Description, FCR-635, Aug. 1984
4. 소형연료전지발전장치의 개발연구, 일본사국연구소 연구보고 No8802, May, 1989
5. R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A General Unified Approach to Modelling Switching-Converter Power Stages," IEEE PESC, pp. 18-34, 1976