

연료전지용 FB 컨버터 병렬 소자수와 스위칭 주파수의 연관성 분석

최중묵 이영진 한동화 김영식 정병환* 신우석** 최규하
 건국대학교 삼성탈레스* 두원공과대학**

The association between number of parallel switching device and switching frequency in FB converter for fuel cell

Choi J.M Lee Y.J Han D.H Kim Y.S Jung B.H* Shin W.S** Choe G.H
 Konkuk university Samsung Thales* Doowon Tech. College**

ABSTRACT

본 논문은 현재 연료전지의 전력변환시스템에서 고주파 절연 방식 중 많이 사용 되고 있는 Full-Bridge컨버터의 실제 모델을 손실을 수식적으로 계산하였다. 전류의 부담을 줄이는 방법으로 사용하는 MOSFET을 병렬로 여러 개 연결할 경우와 스위칭 주파수를 변화시켰을 경우를 시뮬레이션 툴(ORCAD)과 MATLAB을 이용하여 해석하였다

Keyword: 연료전지, 풀브릿지 컨버터, 효율, MOSFET 손실

1.서론

신재생 에너지 중 연료전지는 물의 전기 분해의 역반응으로서 연료의 화학적 에너지를 전기화학반응을 통하여 직접 전기로 전환하는 방식으로, 공기 중의 산소를 활용하며, 수소를 연료로 사용하여 하나의 에너지 변환단계에서 전기를 얻을 수 있다는 점에서 기존의 발전과는 에너지 변환효율 및 환경오염 측면에서 주목받고 있다.

출력전압이 낮은 연료전지 발전시스템에서의 승압용 DC-DC 컨버터는 비 절연용으로는 높은 승압 비를 구현하기 어려우므로 고주파 변압기를 사용하는 절연형 방식을 주로 사용한다. 절연형 컨버터 방식 중 Flyback 방식과 Forward 방식은 고주파 변압기의 코어를 한쪽의 극성으로만 사용하므로 코어의 이용률이 50[%]로 낮아 부피상승의 요인이 된다.^[2]

그러므로 본 연료전지 발전시스템에서는 구성이 간단하고 대전력 발전까지 쉽게 적용할 수 있는 그림1과 같은 고주파 절연시스템 풀브릿지 DC-DC 컨버터를 연구대상으로 선정하였다.

본 논문에서는 풀브릿지 컨버터의 각 부의 손실 중 스위칭 소자에 관하여 수식을 이용하여 원리적으로 계산하였으며 시뮬레이션을 통하여 데이터를 비교 분석하였다.

특히 저전압 대 전류의 특성을 갖는 연료전지시스템에서는 스위칭 전압강하를 줄이고, 전류의 부담을 줄이는 방법으로서 스위칭소자를 병렬로 여러 개 연결할 경우와 스위칭 주파수를 변화시켰을 경우 각각의 손실을 알아보았고 이를 통하여 효율 개선의 방안을 제시하였다. 원리적인 계산은 MATLAB을 사용하였으며 시뮬레이션은 CADENCE사의 ORCAD 16.0을 사용하였다.

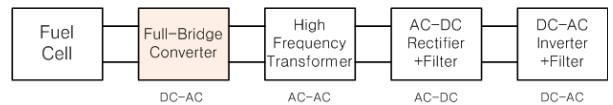


그림 1. 고주파 절연 시스템
 Fig. 1 High Frequency isolation system

2.고주파 절연 풀브릿지 컨버터

2.1 컨버터에서의 손실

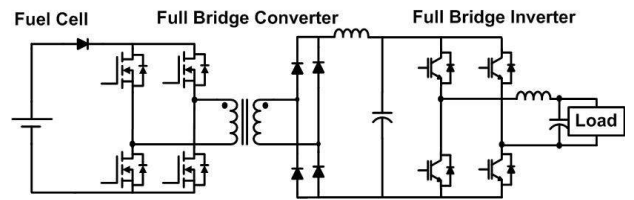


그림 2. 풀 브릿지 컨버터
 Fig. 2 Full-bridge Converter

그림 2 에서 나타내어진 전력변환장치는 풀브릿지 컨버터이다. 풀브릿지 컨버터는 변압기 양단에 직류전원의 크기와 동일한 피크치를 갖는 교류전원이 인가되어 변압기의 권선비가 적은 장점이 있으나, 다른 토폴로지에 비해 많은 스위칭 소자를 가지는 단점이 있고 변압기에 교류자속을 형성하기 위해 항상 2개의 스위칭 소자가 도통상태가 되어 손실이 발생한다. 그러므로 대전류 저전압의 특성을 가진 연료전지 시스템에서 풀브릿지 컨버터의 설계시 손실이 고려되어야한다. 그중에서도 실제 연료전지용 풀브릿지 컨버터에서의 스위치 손실발생에 대하여 원리적으로 해석하기로 한다.

2.2 스위치에서의 손실

MOSFET 전력 손실은 다음과 같이 스위치 turn on 천이 구간, 도통구간, turn off 천이구간의 3부분으로 구분 할 수 있고, 각 구간별 손실에 대한 표현은 식(1)-(3)과 같다.

$$P_{sw}(t_{on}) = \frac{1}{2} \cdot V_s \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot t_{on} \quad (1)$$

$$P_{sw}(t_{cond}) = I_D^2 \cdot R_{DS} \cdot t_{cond} \cdot f_{sw} \quad (2)$$

$$P_{sw}(t_{off}) = \frac{1}{2} \cdot V_s \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot t_{off}$$

(3)

총 스위치 손실은 식(4) 이다

$$P_{sw} = P_{sw-on} + P_{sw-off} + P_{sw-cond}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot I_D \cdot V_s \cdot f_{sw} (t_{on} + t_{off}) + I_D^2 \cdot R_{DS} \cdot t_{cond} \cdot f_{sw}$$

여기서 R_{DS} : MOSFET의 드레인-소스간의 ON 저항, I_D : MOSFET의 도통 전류, V_s : 스위치 양단전압, f_{sw} : 스위칭 주파수, t_{cond} : 스위치 도통시간, t_{on} : turn on 천이시간, t_{off} : turn off 천이시간

위 식에서 turn on 천이 상태와 turn off 천이 상태에서 발생 되는 손실을 구하면

$$t_{on} = t_{ri} + t_{fv}$$

$$t_{ri} = R_G C_{iss} \ln \left(\frac{g_m \cdot V_G}{g_m (V_G - V_{GS(TH)}) - I_D} \right)$$

(6)

$$t_{fv} = \frac{C_{GD}(V_s - I_D \cdot R_{DS})}{i_G}$$

여기서 t_{ri} : 드레인 전류 상승시간, t_{fv} : 스위치 양단전압 하강시간, i_G : 게이트 입력 전류, C_{iss} : MOSFET 입력 커패시턴스, C_{GD} : 게이트와 드레인간의 커패시턴스

다음으로 turn off 천이시간을 구해보면 식(8)-(9)와 같다.

$$t_{off} = t_{rv} + t_{fi}$$

$$t_{rv} = \frac{V_s R_G C_{GD}}{V_{GS}}$$

$$t_{fi} = R_G C_{iss} \ln \left[\frac{V_{GS}}{V_{GS(TH)}} \right]$$

여기서 t_{rv} : 스위치 양단전압 상승시간, t_{fi} : 드레인 전류 하강시간, R_G : 게이트 입력 저항, $V_{GS(TH)}$: MOSFET 컷 오프 전압, C_{GD} : 게이트와 드레인간의 커패시턴스

위의 식으로 실제 설계에 사용한 MOSFET의 스위칭 손실을 구해보자, 스위치 소자로는 IRFP4332를 병렬로 2개씩 총 8개를 사용 하였고, 손실분석은 시스템이 정격으로 운전 할 때의 손 실을 분석하였다.

$$P_{sw} = P_{sw-on} + P_{sw-off} + P_{sw-cond}$$

$$= 197[mW] + 266[mW] + 1.75[W] = 2.21[W]$$

위 식으로부터 스위치 한 개당 손실은 2.21[W] 이며, 풀 브리 지 컨버터의 총 스위치 손실을 구하면

$$2.21[W] \times 8 \text{개} = 17.7[W]$$

로 총 17.7[W]의 스위치 손 실이 발생한다.

3.시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

입력전압: 48V / 출력전압: 380V / 정격용량: 1Kw /
 듀티 비 : 0.4 / 변압 비: 48:480

부하는 출력전압 380V에서 1Kw정격을 맞추기 위하여 144.4[Ω]으로 하였고 MOSFET은 IRFP4332, 다이오드는 DSEP 29-12A를 사용하였다. 변압기는 ORCAD에서 구현하기 어려워 ORCAD의 소자에서 XFRM_NONLINEAR를 사용하였으며 손 실을 고려하여 변압비를 올려 설계하였다.

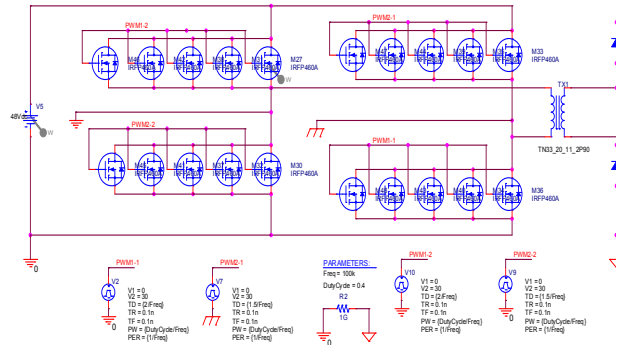


그림 3. 풀브릿지 컨버터 시뮬레이션 회로도
 Fig. 3 Full-bridge Converter Simulation circuit

3.2 스위칭 주파수에 따른 손실분석

주파수에 따른 풀브릿지 컨버터의 효율을 분석하기 위하여 스위칭 주파수를 5kHz에서 100kHz까지 변화시켜 MOSFET의 손실과 컨버터의 효율에 대하여 시뮬레이션하여 분석하였으며 유도한 식에 대입하여 주파수변화에 따른 스위칭 손실 값을 계산하였다

그림3과 4는 주파수 변화에 따른 MOSFET의 손실의 변화를 나타내고 있다. 그래프의 전체적인 추이가 주파수가 증가할 수록 손실이 증가하는 것을 나타내고 있다.

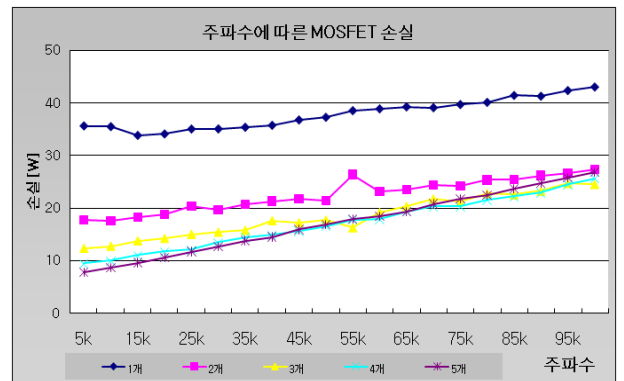


그림 4. 주파수에 따른 MOSFET 손실 시뮬레이션 결과
 Fig.4 MOSFET loss simulation result according to frequency

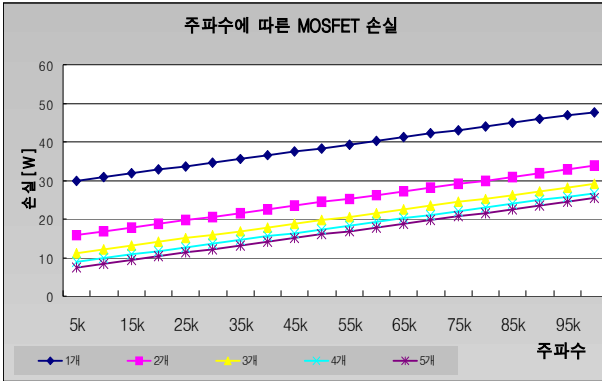


그림 5. 주파수에 따른 MOSFET 손실 계산 결과
Fig.5 MOSFET loss calculation result according to frequency

3.3 병렬 스위칭 소자수에 따른 손실분석

스위칭 소자수에 따른 폴브릿지 컨버터의 효율을 분석하기 위하여 스위칭 소자의 수를 1개에서 5개까지 변화 시켜 MOSFET의 손실과 컨버터의 효율에 대하여 조사를 하였으며 유도한 식을 바탕으로 병렬 스위칭 소자 개수에 따른 손실값을 계산하였다.

그림 5와 6에서는 스위치 병렬 수에 따른 MOSFET의 손실은 나타내고 있다. 그래프를 보면 소자수가 증가할수록 손실이 감소하는 경향을 보이며 시뮬레이션 값과 계산 값에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

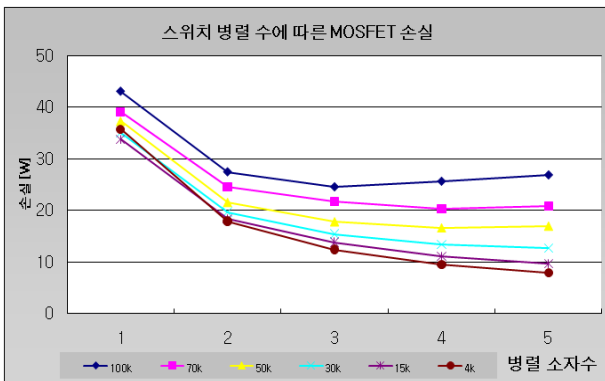


그림 6. 스위치 병렬 수에 따른 MOSFET 손실 시뮬레이션 결과
Fig.6 MOSFET loss simulation result according to number of parallel switches

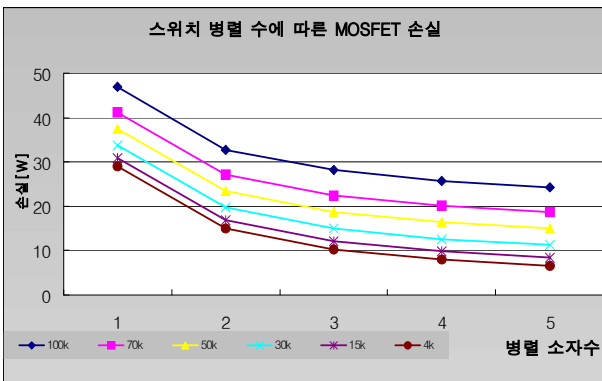


그림 7. 스위치 병렬 수에 따른 MOSFET 손실 계산 결과
Fig.7 MOSFET loss calculation result according to number of parallel switches

4. 결론

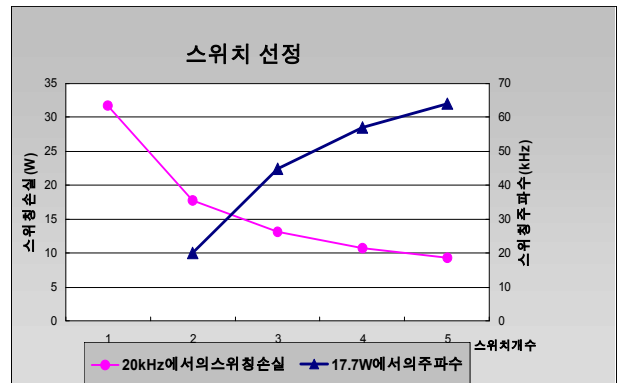


그림 8. 소자수와 스위칭 주파수의 연관성 그래프
Fig.8 The association between number of parallel switching device and switching frequency

병렬 소자 수에 따른 MOSFET의 손실의 변화는 MOSFET에 흐르는 전류가 병렬 소자 수에 반비례하여 감소하는 특성을 보인다. 그 중에서도 스위치가 병렬로 3개까지 연결했을 때는 손실의 눈에 띄는 감소를 확인할 수 있지만 그 이상의 연결은 큰 효과가 없는 것을 그림 8을 통하여 알 수 있다. 또한 연구 대상의 컨버터의 스위칭 손실은 스위치 2개를 병렬로 연결 하였을 때 17.7W의 값으로 나타나는데 같은 손실이 발생한다고 가정했을 때 그림 8을 참고하면 스위치가 2개 병렬일때 20kHz 인데 비하여 3개 일 때는 45kHz 그 이상의 개수를 사용할 때는 스위칭 주파수를 더 높일 수 있어서 스위칭 개수가 많을수록 좋은 것처럼 보일 수도 있으나 스위칭 주파수는 통상 50kHz 이상은 사용하지 않으며 병렬 스위치가 3개 이상 연결하는 것은 큰 효율 증가를 보이지 않는다.

연구 대상 연료전지 시스템에서는 스위칭 주파수 20kHz 병렬 스위치 개수 2개의 설정은 적절하다고 볼 수 있다. 이 외의 시스템에 적용 시에도 병렬 스위치 개수와 스위칭 주파수에 따른 손실을 예측하여 최적설계를 할 수 있다.

이 논문은 지식경제부 (R-2007-1-015-01) 지원의 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 한동화, 김영식, 정병환, 최규하 "연료전지용 폴브릿지 컨버터 효율분석" 전력전자학회 2008년 하계학술대회논문집 2008. 12, pp.21 ~23
- [2] 최세완, 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술, 전력전자학회지, 제 8권, 제 4호, 2003, pp.30-35.
- [3] 안치형 "전류형 능동 클램프 단상 폴브리지 DC-DC 컨버터의 해석 및 손실분석" 충남대학교 석사 학위 논문 2007.
- [4] 장동렬, 서영민, 홍정찬, 윤덕용, 황룡하 "IGBT-MOSFET 병렬 스위치를 이용한 고효율 직류-직류 변환기" 전력전자학회논문지 전력전자학회 논문지 제4권 제2호, 1999. 4, pp. 152 ~ 158 (7pages)