

고전력밀도 벅 컨버터를 위한 주파수 선정 기법

권유경, 김준호
계명대학교

Frequency Design Scheme For High Power Density Buck Converter

Yu-Gyeong Gwon, Jun-Ho Kim
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문은 고전력밀도 Buck 컨버터 설계를 위한 스위칭 주파수 선정 기법을 제시한다. 기생 성분을 고려한 시뮬레이션을 통해 손실을 예측하고 전력밀도와 효율 관계를 검토하여 주파수 선정 기법을 검토한다. 또한 Si 기반 스위칭 소자를 적용한 300W급 48V-12V Buck 컨버터를 설계하고 분석 결과를 기반으로 Si 전력반도체의 고주파 동작 가능성을 검토한다.

1. 서 론

UAM(Urban Air Mobility)은 도시의 인구 밀집화에 따라 새로운 운송수단으로 관심을 받고 있다. 이는 기존 운송 수단인 전기 구동 차량을 대체하므로 유사한 서비스를 제공할 수 있어야 하며, 이에 따라 유사한 시스템의 구축이 필요하다. 최근 차량은 12V의 전압을 48V로 상향하고 있으며, 일부 12V 전원 기반 장치는 고전압화가 완료되지 않아 48V와 12V의 전원 체계를 가지는 과도기적 형태를 보인다.^[1] UAM 또한 운송수단이므로 차량과 유사한 기능이 요구되어 48V-12V의 전원이 필요하다. 또한 UAM은 분산전기추진을 사용하고, 이를 위해 분산전력 제어장치가 요구된다.^[2] 이에 따라 제어장치의 전원전압 공급을 위해 LDC(Low Voltage DC-DC Converter)가 필요하며, 고전력밀도 48V-12V LDC가 요구된다.

컨버터를 구성하는 인덕터와 커패시터의 용량은 스위칭 주파수에 반비례하여, 수동 소자의 부피 저감에 따른 전력밀도의 상승이 가능하다. 그러나 공진주파수를 상회하는 스위칭 주파수는 인덕터와 커패시터의 임피던스 특성을 변화시켜 회로 동작의 불안정을 초래할 수 있다. 따라서 적절한 주파수의 선정이 필요하다.

WBG(Wide Band Gap) 전력반도체 소자는 큰 밴드갭을 가져 고전압 및 고온 환경에서 동작하는 컨버터에 적용 가능하다. 또한 Si 전력반도체에 비하여 전자기동도가 높아 고속 스위칭 동작을 기대할 수 있다.^[3]

동일한 $R_{DS(on)}$ 을 가지는 경우, Si 소자가 WBG 소자에 비하여 낮은 항복전압을 갖는다. 그러나 낮은 항복전압 소자는 $R_{DS(on)}$ 저항의 차이가 작아 중전압 및 저전압 응용에서는 유의미한 차이를 확인하기 어렵다. 그리고 Si 전력반도체의 성능이 향상되어 스위칭에 소요되는 시간(rise time, fall time)이 짧아져 고주파에서의 적용을 고려해 볼 수 있는 수준이다. 또한 WBG 소자는 Si 소자에 비하여 가격이 높다.^[4]

따라서 본 논문에서는 UAM에 적용 가능한 고전력밀도 Buck 컨버터 설계를 위해 스위칭 주파수 선정 기법을 제시하고, Si 전력반도체의 고주파 동작 가능성을 검토한다.

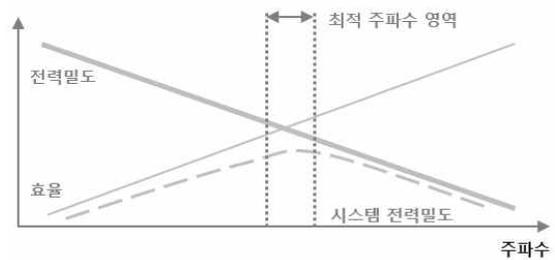


그림 1 주파수 선정 기법

설계주파수	인덕턴스 [μH]	인덕터 Ae [mm ²]	인덕터 Aw [mm ²]	인덕터 Ve [mm ³]
200kHz	11	227	222	13100
400kHz	5	194	193	10200
600kHz	3.5	135	81	5750
800kHz	2.4	130	109	5380
1MHz	2	76	71	2451

표 1 주파수별 설계 파라미터

2. 본 론

2.1 주파수 선정 기법

수동 소자의 용량은 스위칭 주파수에 반비례하므로 주파수 상향에 따라 부피가 저감 된다. 따라서 스위칭 주파수 상향에 따른 고전력밀도화를 기대할 수 있다. 그러나 주파수 상향에 따른 스위칭 손실의 증가로 전력변환시스템의 효율은 저감된다. 이에 따라 주파수 상승에 따른 방열판의 부피 증가가 야기되어 방열시스템을 고려한 시스템 전력밀도는 그림1과 같이 나타난다. 그러므로 시스템 전력밀도가 최대인 지점의 주파수를 선정하는 방안을 제안한다.

2.2 설계

2.2.1 하드웨어 설계

소형화 설계를 위해 Buck 컨버터를 선택하여 출력은 300W급의 48V-12V 컨버터의 하드웨어를 설계하였다. 자속밀도의 변동량이 유지되는 조건하에 200kHz부터 1MHz까지 200kHz 단위로 설계하였다. 인덕터의 설계에 사용된 코어는 Planar-EE Type으로 코어 정보는 상용 코어의 데이터 시트를 활용하였다. 이에 따라 설계된 인덕터의 정보는 표1과 같으며, 권선은 Litz wire로 전류밀도 6A/mm²으로 설계하였고, 커패시터의 용량은 40μF이고 스위치는 Si 전력반도체를 적용하였다.

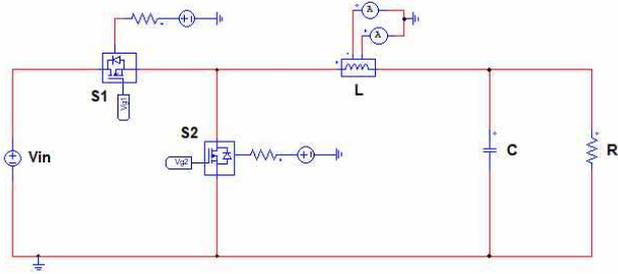


그림 2 PSIM 시뮬레이션 회로도



그림 3 주파수에 따른 주요 소자의 시뮬레이션 및 수식 기반 손실

2.2.2 시뮬레이션 모델링

실험과 유사한 동작 가능성 검증과 손실 정보를 확보하기 위해 PSIM의 Device Databases Editor을 사용하였다. 인덕터와 스위치 라이브러리를 제작하여 기생성분과 주파수 및 온도에 따라 가변하는 성분을 고려하고, 커패시터의 ESR을 포함한 시뮬레이션을 진행하였다. 스위치 라이브러리에는 스위치의 전기적 특성과 바디 다이오드 특성이 반영되고 인덕터는 코어와 보빈의 물리적인 데이터 및 코어 손실-자속밀도 관계 그래프, 코어 손실-온도 관계 그래프와 winding에 대한 데이터를 반영한다.

2.3 시뮬레이션 결과

2.3.1 손실 분석

설계별 시뮬레이션 및 수식 기반의 계산 손실은 그림3과 같다. 두 경우 모두 주파수가 증가할수록 손실이 증가하며, 주요한 손실 발생 인자는 상부 스위치의 스위칭 손실과 하부 스위치의 바디 다이오드 도통 손실임을 알 수 있다. 손실의 정확한 수치를 예측할 수는 없으나 주파수 상황에 따라 손실이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 계산을 통해 얻은 손실의 차이가 크나, 이는 보정 계수를 적용하여 보완 가능하다.^[5]

2.3.2 주파수 선정

그림4는 주파수에 따른 효율과 전력밀도 그래프이다. 여기에서 전력밀도는 컨버터를 구성하는 전기 소자의 부피만을 포함한 것이다. 앞서 제시한 주파수 선정 기법의 개념과 같이 주파수가 상승함에 따라 효율은 감소하고, 전기소자만을 포함한 전력밀도는 증가하는 경향을 보인다. 그러나 손실 증가에 따른 방열 구조물의 부피 증가를 고려하면 시스템의 전력밀도 상승은 한계를 갖는다. 따라서 시스템의 전력밀도는 일정 주파수에서 감소하는 경향을 보인다.

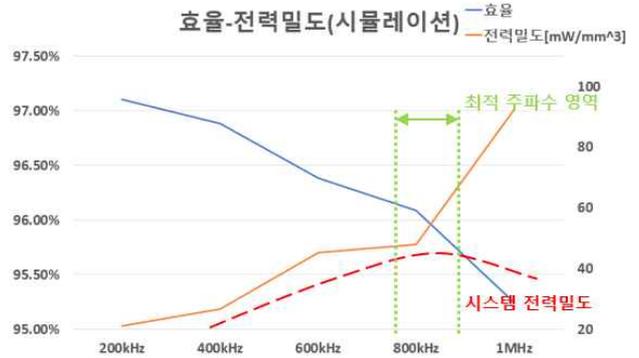


그림 4 주파수에 따른 효율 및 전력밀도 그래프

3. 결론

본 논문에서는 고전력밀도 컨버터 설계를 위한 주파수 선정 기법과 Si 전력반도체의 고주파 구동 가능성 검토하였다. 이를 위해 주파수를 가변하여 컨버터 설계를 진행하고, 기생 성분 및 온도에 따라 가변하는 성분을 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 주파수 상황에 따라 전력밀도는 감소하고 효율은 증가하는 결과를 얻어 전력밀도와 효율이 교차하는 지점을 확인하였다. 손실에 따른 방열판의 부피 증가로 인한 시스템의 전력밀도 감소를 적용한다면, 본 논문에서 제시한 기법으로 고전력밀도 조건을 달성하기 위한 주파수를 선정할 수 있다.

본 논문에서는 제시한 주파수 선정 기법을 시뮬레이션을 통해 검토하였으므로 보완 연구에서 실험을 통해 신뢰성을 확보하고자 한다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술기획평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)(No. 20019073, 차량용 모듈러형 고집도 전력모듈 및 고전력밀도 전력변환 적용기술 개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Taehyung Kim., Sangshin Kwak, “A Flexible Voltage Bus Converter for the 48-/12-V Dual Supply System in Electrified Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.66, No.3, March 2017
- [2] Hyun-Dae Kim., et al., “Progress in Distributed Electric Propulsion Vehicles and Technologies”, NASA Armstrong Flight Research Center, 2020
- [3] Jeong-Hyun Lee, et al., “High Technology and Latest Trends of WBG Power Semiconductors”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 17-23, 2018
- [4] Li Zhang, et al., “A Review of WBG and Si Devices Hybrid Applications”, *Chinese Journal of Electrical Engineering*, Vol.7, No.2, 2021
- [5] 강태환, 유지윤, 이광운, “PSIM을 이용한 전력 반도체 소자의 개선된 손실 추정”, *전력전자학회 추계학술대회 논문집*, 127-129, 2008