

EDF 모델링을 이용한 저궤도위성 다중 출력 컨버터 설계 및 검증

윤석택*, 양정환*

Low-earth orbiting satellite multi-output converter design and verification by using EDF modeling

SeokTeak Yun*, JeongHwan Yang*

요 약

위성의 전력 시스템은 전력의 생산, 변환 및 분배를 담당하는 주요한 시스템으로, 임무 수명뿐 아니라 임무 횟수, 시기 등의 설계에 사용된다. 이중 전력의 변환을 담당하는 변압기의 부하와 입력 조건에 따라 안정화 설계가 이루어져야 하지만, 실제 궤도상에서 Test 및 check-out을 진행할 수 없는 특성으로 다양한 입출 조건 변화에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위한 방법이 요구된다. 일반적으로 위성 컨버터는 다양한 부하 조건에 따라 설계되므로, 부피 및 설계의 효율성을 위해 다중 출력 및 여러 개의 stage를 거쳐서 전력 변환이 이루어지게 된다. 하지만, 이로 인해 분석에 많은 어려움을 지니게 되어 직관적인 회로의 파악은 쉽지 않게 된다. 또한 일반적인 분석으로는 모든 상태 방정식의 해를 구하기 쉽지 않아서 실제 운용 시에 가해질 수 있는 소자에 대한 영향성에 대한 분석이 힘들 수 있게 된다. EDF model은 fundamental 주파수 분석을 통해 모든 소자에 대한 분석이 가능한 방법이며 multi-stage의 경우에도 입력 모델링으로 한꺼번에 1st stage와 2nd stage의 분석이 가능한 방법이다. 본 논문에서는 EDF 방법을 통한 modeling과 시뮬레이션 modeling을 비교하여 적용의 타당성을 분석하고, 이를 통해 제어기를 설계하여 multi-stage 컨버터의 직관적인 회로 분석이 가능함을 확인 하였다.

Key Words : Converter; Controller Design; EDF Approximation Modeling; Current Mode Control.

ABSTRACT

Satellite power system is critical for mission design and survival operation. Accordingly power conversion circuit has to stable design and verify for operation condition change (load, voltage, thermal condition). however, multi-stage make complicate for modeling and get all state solution. In this paper present all state solution for multi-stage converter by using Extended Describing Function(EDF) modelling. EDF modelling has merit to solve complex circuit but it has limit too. Because of fundamental approximation, EDF modeling is not match all topology. Consequently, we verify passible topology for EDF modeling and stable design multi-stage converter.

I. 서 론

대부분의 위성 시스템과 마찬가지로 전력 시스템 역시 발사 이후 실제 궤도상에서 Test 및 activation을 진행하기 힘든 특성이 있으므로, 대략적인 성능 및 동작을 유추 할 수 있는 모델링 및 시뮬레이션 방법이 요구된다. 저 궤도 위성의 전력 변환 시스템의 간략화한 다이어그램은 그림1과 같다. Solar-array를 통해 발생된 전력을 배터리 및 부하에 공급하기 위해 일차적으로 변환하게 되며, 이렇게 변환된 전압을 다

시 다양한 부하에 공급하기 위해 이차적으로 변환을 진행하게 된다. 이차 변환에서는 잉여 설계로 인한 복잡성 및 부피를 줄이기 위해 다중 출력이 일반적으로 사용된다. 따라서 multi-stage 및 다중 출력 설계로 인해 1,2차 컨버터의 전체적인 직관적 모델링 분석은 어려워진다.[1] 본 논문에서는 Extended Describing Function (EDF) 방법을 통해 multi-stage 컨버터의 모든 상태 변수의 대신호와 소신호의 해를 구하였고, 이를 통한 multi-stage 컨버터의 EDF 모델링을 시뮬레이션 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증 하였다.

*한국항공우주연구원 (yungun@kari.re.kr), 교신저자 : 윤석택

접수일자 : 2012년 9월 3일, 수정완료일자 : 2012년 9월 7일, 최종 게재확정일자 : 2012년 9월 12일

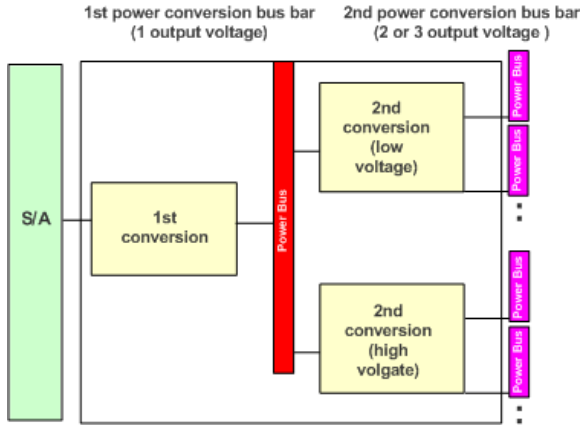


그림 1. 저궤도 위성의 전력 변환 다이어그램

II. EDF modeling 및 simulation modeling

전력변환 시스템을 모델링 하기 위해서는 각 스테이지의 등가회로가 요구된다. 우선 first stage 등가회로는 그림2와 같이 나타내었다. 이 등가회로는 입력 필터와 필터의 댐핑을 위한 추가 회로 및 기본적인 기생 성분을 포함하고 있다. 그림 3은 first stage에서 정류된 전원을 부하에 맞게 변환하는 second stage의 등가 회로를 나타내고 있다. 일반적으로 second stage 출력 전압은 부하에 직접 연결되는 경우가 많으며, 이로 인해 좁은 출력 변화 범위를 요구하게 된다. [2] 따라서 상대적으로 안정화를 위한 신뢰성 있는 제어기 설계가 필요하다. 본 논문의 분석에 사용된 전력 변환기는 절연 기능 및 필터가 포함되어 있다. 만약 절연 기능이 필요하지 않은 경우에는 권선 비 N을 1로 대입한 뒤 magnetic inductance Lm에 충분히 작은 값을 대입하여 model한다.

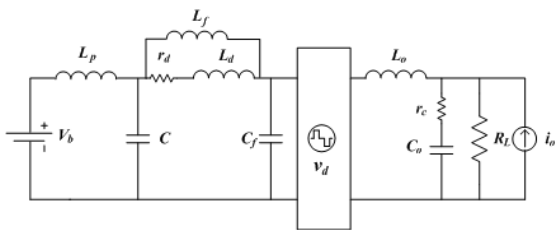


그림 2. 1st stage 전력 변환기 등가회로

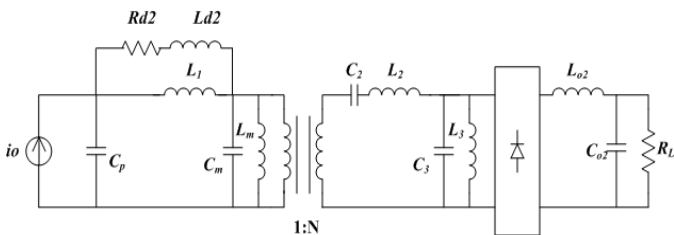


그림 3. 2st stage 전력 변환기 등가회로

1. EDF modelling

그림 2,3의 등가회로를 상태를 미분 방정식으로 나타낸 뒤, 상태 방정식의 기본과 근사 (sin 및 cos 항으로 변환) 후 Fourier 급수를 이용하면 EDF 근사 결과를 얻을 수 있다. 이후 공진 소자들대해서 각 상태 미분 방정식으로 얻은 결과에서 미분 항을 영으로 근사하면 정상 상태 해를 구하여 대신 호 분석을 진행할 수 있다. [1] 또한 각 상태 미분 방정식의 소 신호 perturbation 및 테일러급수의 선형화 과정을 거치면 모든 파라미터의 소 신호 전달 함수를 구할 수 있게 된다. 이 과정에서 각 미분 방정식의 비선형 항이 존재하게 된다. 즉 스위칭 소자에 의해 만들어 지는 전압과 출력 인덕터 전류가 정류 다이오드에 영향을 주어 출력 캐패시터의 전압의 방향이 달라지는 출력 캐패시터 전압의 묘사가 필요하다. 이러한 비선형 항들은 각 파형의 fundamental approximation을 수행하여 각 state로 표현한다. 이는 표 1에 나타내었다.

표 1. Extended describing function

Function name	fundamental approximation
symmetry switching voltage or current	$f_1 = \frac{4}{\pi} \cdot V_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot d\right) \cdot \sin(\omega_s \cdot t)$
asymmetry switching voltage or current	$f_1 = \frac{2}{\pi \cdot (1-D)} \cdot \sin(\pi \cdot D) \cdot v_g \cdot \sin(\omega_s \cdot t)$
out-put capacitor voltage sign	$f_3(v_{Cd2s}, v_{Cd2c}, i_{Lo}) \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$ $f_2(v_{Cd2s}, v_{Cd2c}, i_{Lo}) \cdot \sin(\omega_s \cdot t) +$ where, $f_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{v_{Cd2c}}{\sqrt{v_{C2s}^2 + v_{C2c}^2}} \cdot i_{Lo}$ $f_3 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{v_{Cd2c}}{\sqrt{v_{C2s}^2 + v_{C2c}^2}} \cdot i_{Lo}$
out-put capacitor voltage absolute value	$ v_{Cd2} \cong f_4(v_{Cd2s}, v_{Cd2c})$ where, $f_4 = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{v_{C2s}^2 + v_{C2c}^2}$

2. simulation modeling comparison

EDF modelling은 fundamental 성분을 이용하므로, 실제 전달함수와 약간의 차이를 보일 수 있다. 특히, 비대칭 스위칭 토폴로지를 이용한 경우에는 예상하지 못한 차이를 보일 수도 있다. 따라서 EDF modelling 결과를 통한 안정화 설계 이전에 시뮬레이션 결과와 비교하여 타당성 및 차이를 확인할 필요가 있다. 본 장에서는 사용한 토폴로지에 따른 modelling 결과를 비교 하여 사용이 가능한 경우에 대해서 알아본다. 그림 4는 대칭 구동 파형의 절연형 컨버터의 공진 스위칭 주파수 구동 시의 simulation 과 EDF model과의 차

이를 보여 주고 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 스위칭 주파수 이전의 저 주파에서는 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 반면에 그림 5는 비대칭 구동 시의 modelling 결과를 확인 할 수 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 비대칭 파형 구동의 경우 fundamental 주파수를 사용하는 EDF model과 simulation 결과가 상이함을 확인 할 수 있다. 따라서 실제 EDF model을 사용하여 분석을 하는 경우에는 비대칭 파형 구동 시 및 스위칭 주파수와 공진 주파수에 주의 하여 적용하여야 함을 확인 할 수 있다.

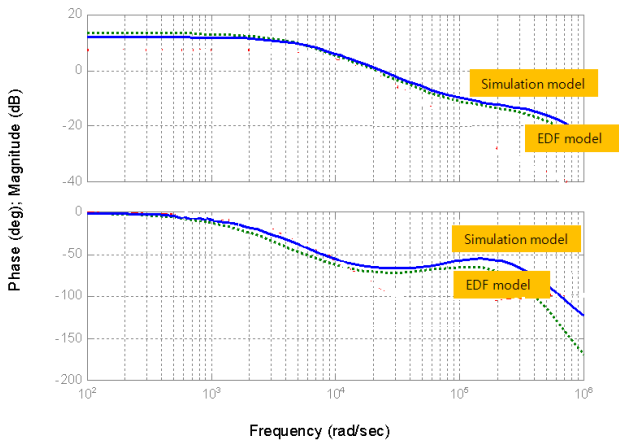


그림 4. open loop gain simulation vs. EDF (symmetry)

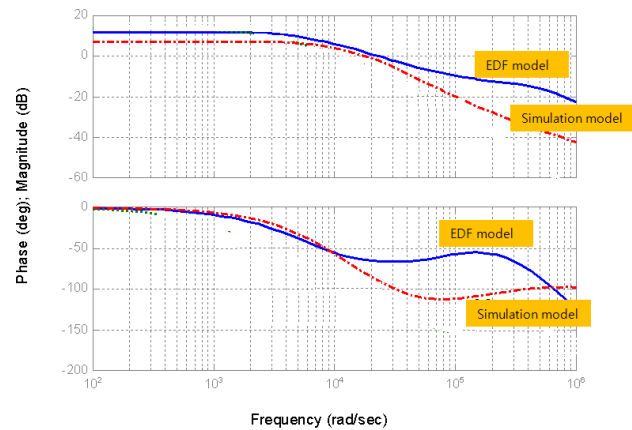


그림 5. open loop gain simulation vs. EDF (asymmetry)

III. 제어기 설계 및 성능확인

EDF model과 simulation model의 비교에서 확인할 수 있듯이 대칭형 구동 회로 및 절연형 컨버터 공진 주파수를 이용하는 경우에는 분석이 타당함을 확인할 수 있다. 따라서 본장에서는 분석한 modeling을 통해 1,2차 전력 변환기의 제어기를 설계하고 시뮬레이션으로 설계 및 분석을 검증하였다. 그림 6은 일반적으로 사용되는 peak current mode 제어기의 block 다이어그램을 나타낸다. peak current mode 제어

기는 리플이 적게 설계가 가능하여 위성의 부하 변화에 대한 부담을 줄이 수 있기에 1,2차 컨버터의 제어기의 설계에 사용하였다. [3] 각 전달함수는 EDF modelling을 통해 얻어진 결과를 사용하고, duty를 통해 전류와 전압을 제어한다. 그림 7은 이를 통해 설계된 first stage의 loop gain을 나타내고 있으며, 그림에서 확인할 수 있듯이 cut-off 주파수는 주 공진 주파수 전인 30Khz로 선정하였고, phase margin은 51도로 설계 하였다. 이후 설계된 제어기의 부하 입력 변동에 따른 영향성을 확인하기위해 10% 부하 변동 시 동작을 확인 하였다. 그림8에서 확인한 것과 같이 4%정도의 출력 전압의 범위 내에서 제어가 진행되는 되는 것을 확인 할 수 있다. 같은 방법으로 first stage가 포함된 second stage의 closed loop를 설계하였고 이는 그림 9와 같다. second stage는 60khz cut-off 주파수에서 phase margin 67도를 갖도록 설계되었다. 모델링 및 설계된 제어기의 성능을 확인하기위해 second stage는 first stage에 비해 부하 변화의 범위가 크므로 50% 부하 변동 시의 동작을 확인 하였고 그림10에서 확인할 수 있듯이 0.5%의 출력 전압의 범위로 제어됨을 확인 하였다. 이를 통해 설계한 모델링과 제어기 설계가 모두 타당함을 확인 할 수 있다.

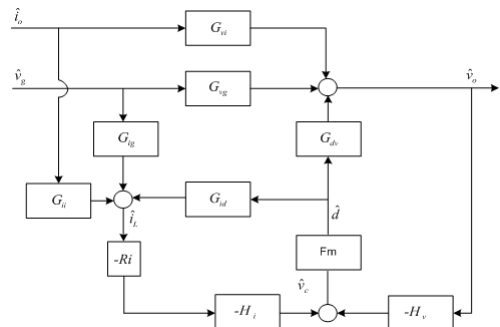


그림 6. current mode control diagram

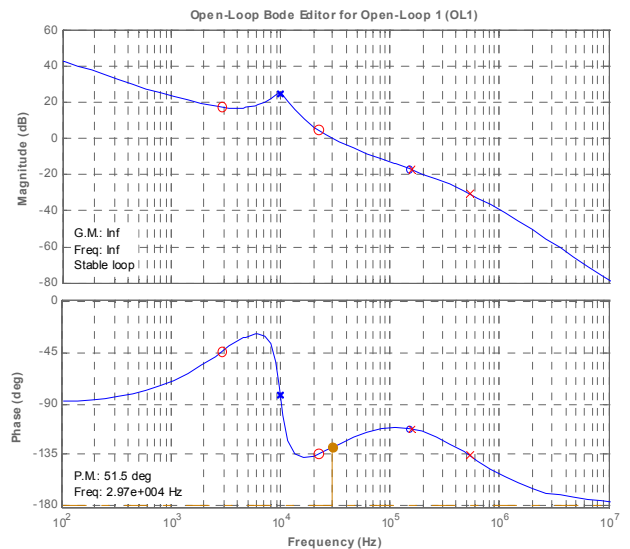


그림 7. first stage closed loop control bode plot

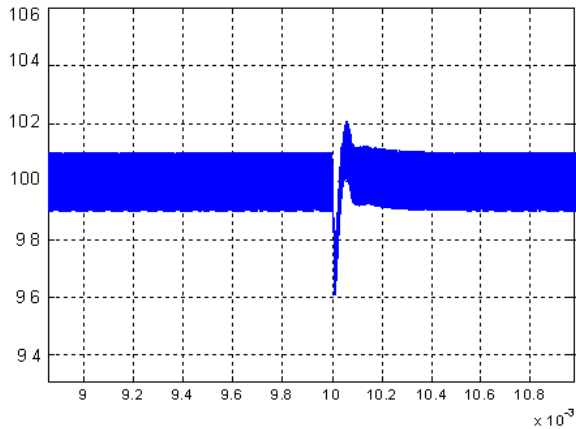


그림 8. first stage load variation to out-put voltage

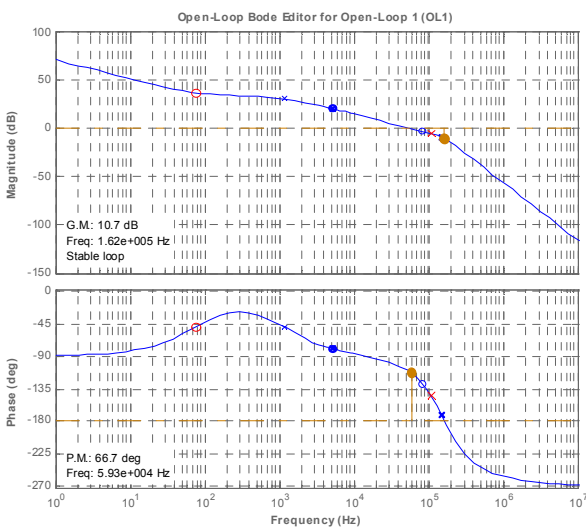


그림 9. second stage closed loop control bode plot

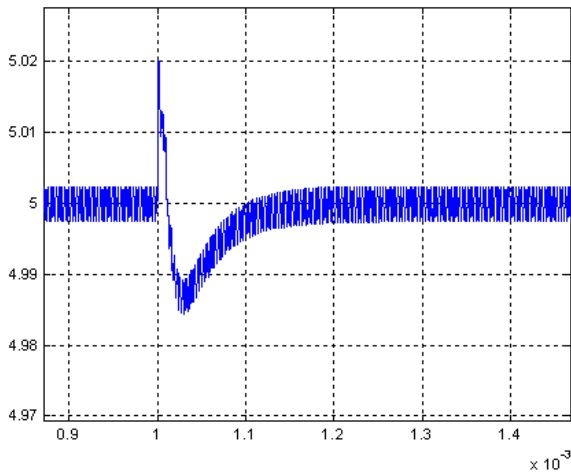


그림 10. second stage load variation to out-put voltage

IV. 결론

일반적으로 위성 컨버터는 다양한 부하 및 조건에 따라 설

계되므로, 부피 및 설계의 효율성을 위해 다중 출력 및 여러 개의 stage를 거쳐서 전력 변환이 이루어지게 된다. 하지만, 회로의 복잡성으로 인해 분석에 많은 어려움을 지니게 되어 직관적인 회로의 파악은 쉽지 않게 된다. 또한 일반적인 모델링 분석으로는 모든 상태 방정식의 해를 구하기 쉽지 않아서 실제 운용 시에 가해질 수 있는 소자에 대한 영향성에 대한 분석이 힘들 수 있게 된다. EDF model은 fundamental 주파수 분석을 통해 모든 소자에 대한 분석이 가능한 방법이며 multi-stage의 경우에도 입력 모델링으로 한꺼번에 first stage와 second stage의 분석이 가능한 방법이다. 본 논문에서는 EDF 방법을 통한 modeling과 시뮬레이션 modeling을 비교하여 적용의 타당성을 분석하고, 이를 통해 제어기를 설계하여 multi-stage 컨버터의 직관적인 회로 분석이 가능함을 확인 하였다.

참고 문헌

- [1] G. C. Verghese, M. E. Elbuluk, and J. G. Kassakian, "A General Approach to Sampled-data Modeling for Power Electronic Circuits," IEEE Trans. On Power Electron., 1986, PE-1, (2), pp. 76-89.
- [2] Y. Li, W. Chen, "AC-DC converter with worldwide range input voltage by series and parallel piezoelectric transformer connection", IEEE PESC Record, pp. 2668-2671, 2004
- [3] Raymond B. Ridley. "A New, Continuous-Time Model For Current-Mode Control", IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS, vol. 6, no. 2, pp 271-280, 1991.

저자

윤 석 택(SeokTeak Yun)



- 2005년 7월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사졸업
- 2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사졸업
- 2007년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 위성설계 및 운용, 위성용 전력회로

양 정 환(JeongHwan Yang)



- 2006년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사졸업
- 2008년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사졸업
- 2011년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 위성용 전력회로, 전력회로 제어 및 모델링