저궤도 위성의 정 전압 변압기 일반화 모델링 및 적용

윤 석 택* 정회원

Generalization modeling and verify for low-orbit satellite regulation converter

Seok-Teak Yun* *Regular Members*

요 약

위성은 효용성 증가로 지속적인 발전를 거치며 여러 종류의 위성이 개발 및 계획이 진행되고 있으며, 여러 가지 필수적인 시스템을 포함하고 있다. 이중 전력 공급 시스템은 위성의 수명에 직접적인 영향을 가지고 있으며, 다양한 요구에 맞게 설계가 이루어 져야 하는 특성을 지니고 있다. 따라서 위성의 설계 요구조건에 부합하는 전압 변압기의 설계 및 안정한 제어가 요구된다. 일반적으로 저궤도 위성의 전력 변환은 각 모듈 및 부하에 따라 여러 단계를 거쳐 전달하게 된다. 이러한 다양한 단계의 전력 변환에 대한 분석 및 이를 반영한 설계는 복잡성으로 인해 쉽게 파악하기 힘든 특성을 가지게 된다. 본 논문에서는 간결 화된 일반화 모델링을 통한 대신호, 소신호 분석으로 정 전압 변압기 설계 및 안정화 제어를 위한 방안을 제시한다.

Key Words: Regulation converter modeling; stabilization control; two port modeling.

ABSTRACT

Satellites industry has been developing with the commercial and military needs. Because power system of satellites is very important to survival operation and hard to test, increasing reliability is very critical. Especially LEO small satellites are very sensitive to power system, effective stabilization control is important. Because of various need of load condition, converter design are complicated. Therefore this paper introduced general modeling of LEO small satellite converter system and analyzed stabilization control design. The performance prediction of LEO small satellites power system is typically critical. Because of verity controller and rectification value, it is hard to computation and test implementation. So, this approach has merit that will reduce cost and make more reliable system. Furthermore, it can be constraint of converter specification and controller design. This paper will examine generation a modeling of LEO small satellites power converting system, and a possible guide line to design reliable controller which optimizing power converters of LEO small satellite.

Ⅰ. 서 론

1950년 이후 지속적인 발전을 해온 위성 산업은 상업적, 군사적 유용성으로 인해 꾸준히 연구되고 있다. 이러한 위성은 통신, 추력, 전력 등의 여러 시스템으로 구성되어 있다. 이중에서도 전력계 시스템은 위성의 수명에 직접적으로 연관되어 있으며, 실제 궤도상의 여러 가능한 경우에 대한 예측이 힘든 특성을 가지고 있다. 위성의 전력계 시스템은 전력 생성, 전력 변환, 전력 분배로 크게 나눌 수 있으며, 이중 전력 변환은 다양항 부하 조건 및 설계 조건에 따라 여러 단계로 변환 혹은 다양한 전력 변환이 요구된다. 이러게 다양한 입력 조건 및 부하 변동에 따른 분석은 구성된 전력 변환 시스템에 따라서 변경되므로, 쉽게 파악하기 힘든 특성을 지닌다. 본 논문에서는 이를 위해서 다양한 토폴로지 및 필터에 따라서 예상되는 변압기의 성능을 파악하기 위한 모델링 및 이를 이용한 여러 가지 제어 방식에 따른 설계 가이드라인을 제시 하였다.

Ⅱ. Modeling

일반적으로 위성의 전력 시스템은 다양한 입, 출력 조건

*한국항공우주연구원 다목적5호 체계팀 (yungun@kari.re.kr)

접수일자 : 2011년 11월 27일, 수정완료일자 : 2011년 11월 29일, 최종게재확정일자 : 2011년 12월 2일

이 요구되며, 이에 따라 변압기의 설계가 이루어진다. [1] 이러한 다양한 요구 조건을 만족시키기 위해 사용되는 토폴로지, 입, 출력 필터, 댐핑 회로가 설계된다. 따라서 이러한 설계 및 성능 분석을 위한 모델링을 입력, 변환기, 출력으로 나누어서 진행하였다. 그림 1.은 정상 상태 및 소신호 분석을 위해 사용될 변압기의 등가회로를 나타내고 있다. 이 등가회로에는 입력 및 출력 필터가 포함되어 있으며, 이들을 위한 댐핑 회로 및 기생 성분을 포함하고 있다. 사용되는 토폴로지 및 실험데이터를 통한 기생 성분 측정 결과에 입력 하고 모델링으로 획득한 정상 상태 분석을 통해 요구 조건을 만족하는 설계 및 분석을 진행한다. [2],[3]

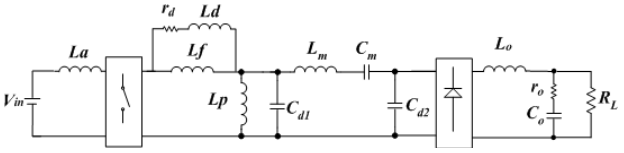

그림 1. Equivalent circuit for derivation of large and small signal modeling

1. Input modelling

등가회로의 스위칭이후의 토폴로지에 따라 다양하게 모델이 가능한다. 기본파 성분을 이용한 분석을 위해, 비대칭 파형 및 대칭 파형인지에 따른 구분이 요구된다. 그림 2는 각 대칭 스위칭 방식을 이용한 파형을 나타낸다. 이를 이용하여 입력파형을 기본파 성분으로 근사하며 식 1과 같이 표현할 수 있다. [4],[5]

$$\frac{4}{\pi}\cdot V_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot d\right) \tag{1}$$

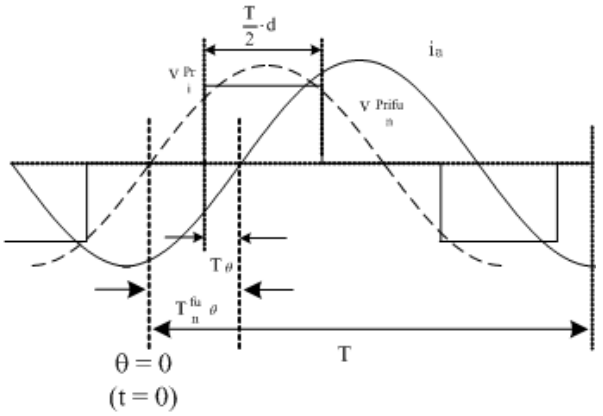

그림 2. Symmetric input voltage waveform

다음으로 비대칭 스위칭 토폴로지를 이용한 파형은 그림 3과 같다. 또한 이를 이용한 기본파 성분의 근사식은 2와 같이 표현이 된다. 입력 파형은 시비률(Duty)가 변하더라도 기본파 성분과 고조파 진폭에는 영향을 미치지만 기본파 성분의 주파수에는 영향을 주지 않으므로 이와 같은 분석이 가능하다.

$$f_1 = \frac{2}{\pi\cdot(1-D)}\cdot\sin(\pi\cdot D)\cdot v_g \tag{2}$$

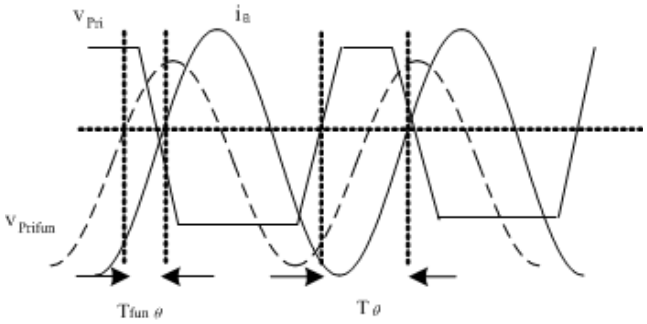

그림 3. Asymmetric input voltage waveform

2. Output modelling

출력 전류 ILo는 필터 인덕터 전류이므로 스위칭에 비해 시정수가 느리므로 DC로 가정이 가능하다. 따라서 출력 전압 Vcd2 및 출력 전류의 위상을 보상한 sgn(ILo)는 평균으로 근사가 가능하다. [6]

3. Transfer function modelling

분석을 위한 모델링 방법은 스위칭 주파수를 이용한 Extended Describing Function (EDF)방법을 사용하였다. 이는 한 번의 수식 유도로 모든 정상상태 변수 및 소신호의 값을 구할 수 있는 장점을 지니고 있다. 우선 각 상태에 대한 미분 방정식을 구한 후, 모든 상태 방정식을 기본파 성분으로 근사하여 전달 함수를 구하게 된다. 이러한 전달함수에 추가적으로 위상차를 나타낸 전달함수를 구하기 위해 그림 2,3를 이용하게 된다. 대칭형 파형인 경우 기본파성분과 실제 파형과의 듀티에 의한 위성 오차가 일정 하므로, 전압이 기호가 변하는 순간을 기준으로 일차측 전압과 Vcd2의 위상차 및 이차측 전압과 Ilo와 위상차의 표현이 가능하다. 반면 비대칭 파형의 경우에는 시정수에 따라 위상의 크게 달라지므로, 이로 이한 공진 전류와의 위상차 분석이 달라진다. 표.1에 이에 대한 결과를 나타내었다. 이를 이용하며 정상상태에서의 변압기의 위상 차 역시 분석이 가능하다. 또한 소신호 분석을 위해 perturbation 및 선형화를 진행하면 소신호 전달 함수를 구할 수 있다. 다음으로 외란에 대한 안정화 성능을 위한 소신호 분석 및 제어기 설계가 요구된다. 일반적으로 변압기는 제어 하고자 하는 요구 조건에 따라 여러 가지 소신호, two port modeling 이 가능 하다. 그림 4.는 제어 방식에 따른 2개의 입력(입력 전류, 출력 전류) 및 2개의 제어 입력(시정수, 스위칭 주파수)으로 여러 가지 출력(출력 전압, 변압기 전류, 입력 전류, 위상)을 제어 할 수 있는 two port model를 나타낸다. 즉 입력 성분으로부터 두 개 혹은 한 개의 제어 성분으로 원하는 출력 성능을 보장하기 위한 안정화 설계가 요구 된다.

표 1. Phase difference according to waveform

위상	계산 식
VAB-Vcd2 (대칭)	$\theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{i_{Lmc}}{i_{Lms}}\right)$
VAB-Vcd2 (비대칭)	$\theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{i_{Lmc}}{i_{Lms}}\right)$
VAB-ILo (대칭)	$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{i_{L1c}}{i_{L1s}}\right) - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\cdot D$
VAB-ILo (비대칭)	$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{i_{Lc}}{i_{Ls}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(\frac{D}{1-D}-\frac{D}{1-D}\cos(\frac{D}{T}2\pi))}{(\frac{D}{1-D}(\sin\frac{D}{T}2\pi))}\right)$

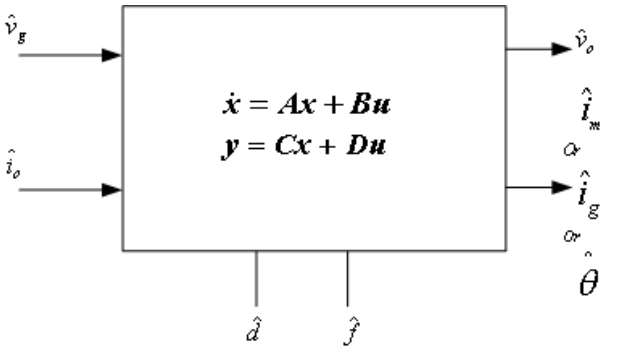

그림 4. Two port small signal modeling diagram

Ⅲ. parameter and control design

EDF 모델링을 통해 획득한 정상상태 및 소신호 모델을 통해 안정성 분석 및 설계를 진행할 수 있다. 그림 5는 입력 필터의 설계에 따른 안정성을 분석하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 입력 필터의 존재로 인해 제어기 설계의 마진에 영향을 미칠 수 있으며, Q factor의 영향으로 비 안정화 되는 구간이 존재 하므로 이를 보상하기 위한 댐핑 성분을 동시에 반영할 수 있는 설계가 이루어 져야 한다. 그림 6은 이를 반영한 입력 및 출력 임피던스의 비교를 나타내었다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 둘 사이의 간섭이 존재 하지 않게 설계가 이루어진 것을 확인 할 수 있다. 다음으로 외란에 대한 소신호 안정화 설계를 위해 그림4의 two port model을 이용하여 제어기를 설계 할 수 있다. 일반적으로 변압기는 시정수를 이용하여 출력 전압을 제어 하는 방식을 사용한다. 본 논문에서는 시정수를 이용하여 변압기의 전류 및 출력 전압을 제어 하는 방식과 시정수와 출력 주파수를 동시에 제어 하여 출력 전압과 위상을 제어 할 수 있는 제어기의 설계를 통해 모델링의 타당성과 적용 가능성을 검증 하였다. 그림 7은 시정수를 제어 성분으로 변압기 전류(Im) 및 출력 전압 (Vo)을 제어하기 위한 block diagram을 나태내고 있다. 그림에서 원하는 소신호 외란에 대한 안정화 설계를 위해서 시정수부터 변압기 전류의 전달함수 와 시정수부터 출력 전압의 전달 함수가 요구 된다. 소신호 modeling을 구한 전달함수를 안전화 하게 설계한 overall loop gain은 그림 8과 같고 이를 통해 확인한 변압기의 외란에 대한 안정화는 그림 9와 같이 10% 부하 변동에 따른 시뮬레이션 결과를 나타 내었다. 다음으로 변압기의 시정수와 주파수를 통해 출력 전압과 변압기를 거치는 위상차를 제어 하는 방식에 대한 block diagram은 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 각 독립된 제어 성분으로 독립된 출력을 제어하기 때문에 각각의 전달함수에 대해서 두 가지 접근이 가능하다. 두 개의 독립적인 루프가 존재 하게 되므로, 서로 간섭이 발생하지 않도록 양쪽의 제어기의 bandwidth에 차이를 두어 서로 제어하는 시정수를 다르게 하는 방법과, 양쪽의 루프 모두 마진을 크게 설계하여 간섭을 줄이는 방식이 가능하다. 본 논문에서는 설계의 편의성을 고려하여 전자의 방법으로 제어기를 설계하였다. 최종적으로 변압기에 필요한 요구 조건은 출력 전압이므로, 보다 큰 bandwidth를 가지도록 설계하였고, 위상을 제어하기 위한 제어기의 bandwidth는 출력 전압을 위한 제어기의 약 1/5이 되도록 설계하였다. 또한 설계 된 modeling 및 안정화 설계를 검증하기 위해서 부하 변동에 따른 출력 전압의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그림 11은 부하 10% 변동에 따른 변압기의 출력 전압의 안정화를 보여 준다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 안정화가 되어 동작하는 것을 확인 할 수 있다.

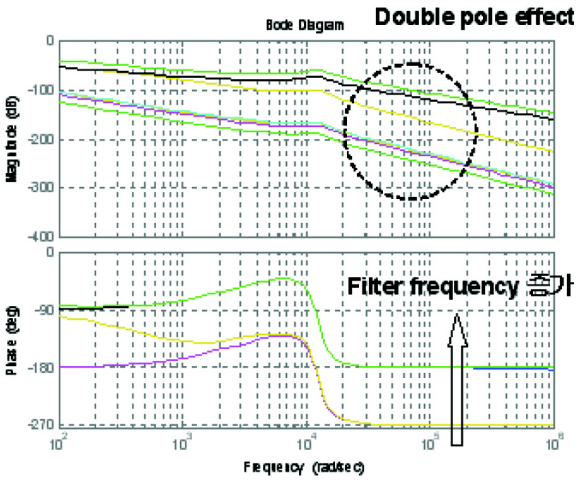

그림 5. Two port small signal modeling diagram

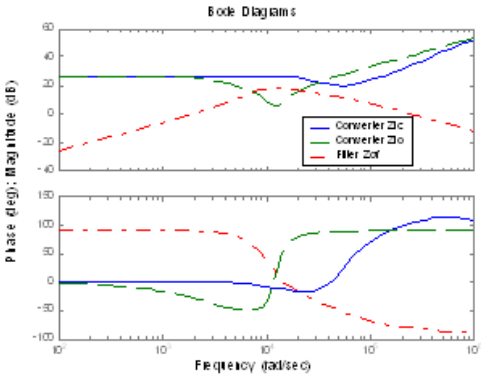

그림 6. Computation of converter input impedance and filter output impedance

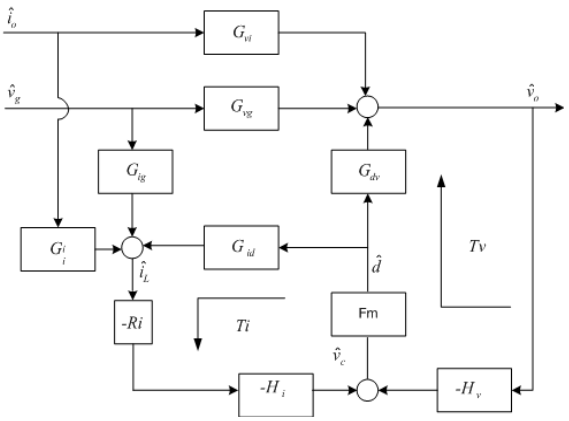

그림 7. Small signal modeling block diagram
(Conver current, Ouput voltage)

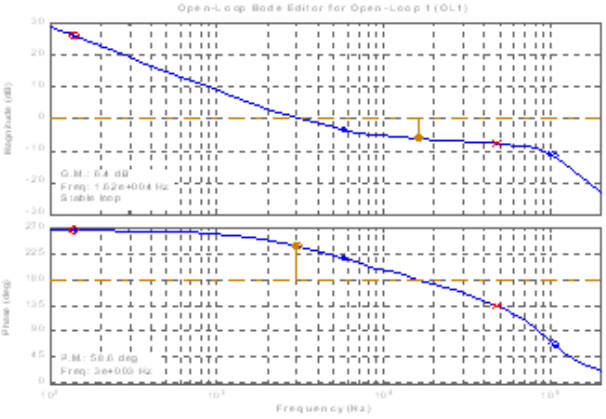

그림 8. Overall loop transfer function

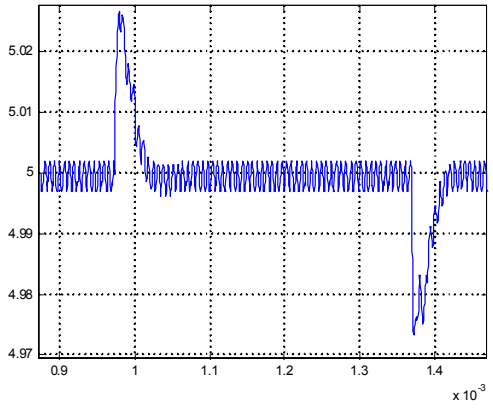

그림 9. Output voltage due to load variation
(Conver current, Ouput voltage)

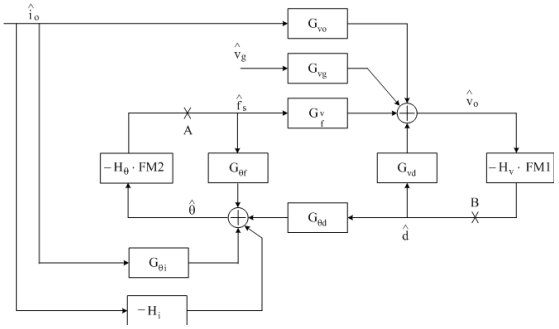

그림 10. Small signal modeling block diagram
(Phase, Output voltage)

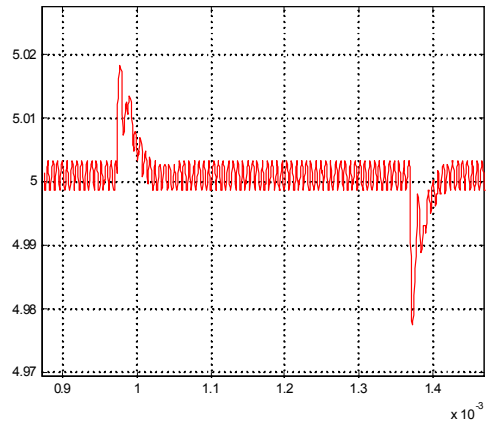

그림 10. Output voltage due to load variation
(Phase, Output voltage)

Ⅳ. Conclusion

본 논문은 다양한 위성의 부하 조건에 따라 다양하게 설계되는 위성 변압기를 설계하기 위한 모델링을 제시 하고 안정화 설계를 위한 가이드라인 제시 및 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 일반적으로 위성의 전력 변환은 임무 수행을 위한 필수적인 시스템이다. 따라서 위성의 성능 예측 및 외란에 따른 분석은 위성의 신뢰성 향상을 위해 필요 하게 된다. 하지만, 다양한 단계로 이루어지는 전력 변환 및 이로 인한 복잡성으로 이러한 분석은 많은 시간이 소요 하게 된다. 따라서 본 논문의 이러한 접근은 의미를 지닐수있다.

참 고 문 헌

[1] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," IEEE Trans. On Power Electron., Vol. PE-3, pp. 174-182, Apr. 1988

[2] A. Charette, K. Al Haddad R. Simard and V. Rajagopalan, "Variable Frequency and Variable Phase Shift Control of Dual Series Resonant Converter for Utility Interface," IECON' 88, pp. 563-568.

[3] Vivek Agarwal, A. K. S. Bhat, "Small Signal Analysis of the LCC-Type Parallel Resonant Converter Using Discrete Time Domain Modeling," IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 42, No. 6, Dec. 1995, pp. 604-614.

[4] 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.

[5] James W. Nilsson, "Electrical Circuits," Addison

Wesley, Fourth Edition, 1993.
[6] Seth R. Sanders, J. Mark Noworolski, Xiaojun Z. Liu, and George C. Verghese, "Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 6, No. 2, Apr. 1991, pp. 251-259.

저 자

윤 석 택 (Seok-Teak Yun) 정회원

2005년 7월 : 포항공과대학교 전기전자공학과 학사졸업
2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사졸업
2007년 8월~현재 : 한국항공우주연구원 재직

<관심분야> 위성시스템 및 운영, 위성전력