

절연형 Inverse-SEPIC 의 동적모델 및 제어특성

박한열, 김은석, 김수석, 송중호
서울산업대학교

Control Characteristics of Isolated Inverse-SEPIC

H.E. Park, E.S. Kim, S.S. Kim, and J.H. Song
Seoul National University of Technology

ABSTRACT

Design equations of II-SEPIC (Isolated Inverse-SEPIC) are derived and its dynamic model is also made using state-space averaging method in this paper. II-SEPIC is comprehensively investigated through the frequency response analysis, compared with those of I-SEPIC (Isolated SEPIC).

1. 서론

최근 컴퓨터 및 IT통신기기와 전자기기의 발달과 더불어 스위칭 전원 장치 (Switching Mode Power Supply) 의 중요성은 더욱 커지고 있다. SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter) 는 Buck-Boost 컨버터나 Cuk 컨버터와는 달리 출력 전압의 극성 변화 없이 전압의 승압, 강압이 가능하고, Flyback 컨버터에 비해 상대적으로 높은 효율과 적은 리플 (Ripple) 성분을 가지며, 절연형으로 구현이 가능한 특징을 가지고 있어 승, 강압형 컨버터가 필요한 여러 분야에 적용이 가능하다. SEPIC 의 역 토폴로지 형태인 Inverse-SEPIC 또한 기본형 SEPIC 과 마찬가지로 출력 전압의 극성 변화 없이 전압의 승압, 강압이 가능하고, 절연형으로 구현할 경우 변압기 권수비를 조절하여 컨버터 전체의 입출력을 조정할 수 있으므로 설계면에서 유연성이 높은 장점을 가지고 있다. 또한, 다중 출력 회로의 구성이 편리하며, 출력 LC 필터의 구현이 용이한 특징이 있다. [1],[2]

그러나 현재 Inverse-SEPIC 의 정상 상태 해석을 수행하고 설계식이 제시되었으나, [1] 절연형 Inverse-SEPIC (II-SEPIC; Isolated Inverse-SEPIC) 에 관한 해석이 고려되지 않았고 SEPIC 과 절연형 SEPIC (I-SEPIC; Isolated SEPIC) 의 동특성 연구와 ZVS Inverse-SEPIC 의 동특성 연구가 수행되었으나 Inverse-SEPIC 의 동특성에 관한 연구는 수행되지 않았다. [3],[4] 본 논문은 II-SEPIC 의 정상 상태 해석을 통해 설계식을 제시하였고, 상태 공간 평균화법 (State-Space Averaging Method) 를 이용한 동적 모델링을 통해 제어기 설계를 위한 주파수 해석을 수행하였다. 또한, I-SEPIC 과 그 특성을 비교하였다.

2. II-SEPIC 의 모델링

스위치의 on/off 를 기준으로 상태 공간 해석을 이용한 모델

링을 수행함에 있어 해석의 간략화를 위해 회로를 구성하는 모든 소자는 이상적인 것으로 가정하고 기생 성분은 고려하지 않는다.

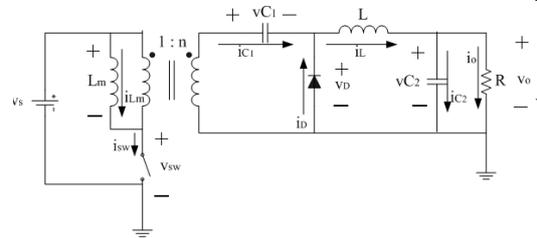


그림 1. II-SEPIC 의 회로

II-SEPIC 의 상태 공간 평균 모델은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{L_m} \\ \dot{i}_L \\ \dot{v}_{C_1} \\ \dot{v}_{C_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{(1-d)}{nL_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{(1-d)}{nC_1} & \frac{d}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L_m} \\ i_L \\ v_{C_1} \\ v_{C_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{d}{L_m} \\ \frac{nd}{L} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} v_s \quad (1)$$

시스템의 소신호와 정상 상태 해석은 정상 상태 동작점 근처에서 동요되는 변수를 가정함으로써 구별된다. [5] 즉, $x = X + \tilde{x}$, $d = D + \tilde{d}$, $v_o = V_o + \tilde{v}_o$, $v_s = V_s + \tilde{v}_s$ 로 가정한다. 정상 상태에서는 $\dot{\tilde{x}} = 0$ 이고 소신호 값 역시 0이므로 II-SEPIC 의 정상 상태 DC 전압 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_s} = n \frac{d}{(1-d)} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 II-SEPIC 은 변압기의 권수비와 듀티비 (Duty Ratio) 를 이용해 출력단의 전압을 승, 강압 할 수 있음을 알 수 있다. AC 전달 함수를 구하기 위해 라플라스 변환 (Laplace Transform) 을 이용하면 다음과 같다. [6]

$$\tilde{x}(s) = [sI - A^{-1}]B\tilde{v}_s(s) + [sI - A^{-1}][(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_s]\tilde{d}(s)$$

$$\tilde{v}_o(s) = C\tilde{x}(s) + [(C_1 - C_2)X]\tilde{d}(s) \quad (3),$$

$$(4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하여 II-SEPIC의 입출력 전달 함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{v}_s(s)} = \frac{a_1s^2 + a_0}{b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_1 &= nDR(n^2C_1L_m) \\ a_0 &= nDR(1-d) \\ b_4 &= n^2L_mLC_1C_2R \\ b_3 &= n^2L_mLC_1 \\ b_2 &= n^2L_mR(C_1 + d^2C_2) + LC_2R_L(1-d)^2 \\ b_1 &= n^2L_md^2 + L(1-d)^2 \\ b_0 &= R(1-d)^2 \end{aligned}$$

제어 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{a_2s^2 + a_1s + a_0}{b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_2 &= n^3L_mC_1R(1-d)V_s, \quad a_1 = -n^3L_md^2V_s \\ a_0 &= nR(1-d)^2V_s \\ b_4 &= (n^2L_mLC_1C_2R)(1-d)^2 \\ b_3 &= (n^2L_mLC_1)(1-d)^2 \\ b_2 &= [LC_2R(1-d)^2 + n^2L_mR(C_1 + d^2C_2)](1-d)^2 \\ b_1 &= [n^2L_md^2 + L(1-d)^2](1-d)^2 \\ b_0 &= R(1-d)^4 \end{aligned}$$

한편, I-SEPIC의 제어 전달 함수는 다음과 같다.^[3]

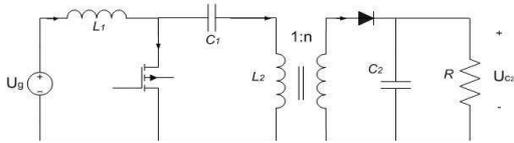


그림 2. I-SEPIC의 회로

$$\frac{\tilde{u}_{i2}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{a_{i3}s^3 + a_{i2}s^2 + a_{i1}s + a_{i0}}{s^4 + b_{i3}s^3 + b_{i2}s^2 + b_{i1}s + b_{i0}} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{i0} &= \frac{U_g}{nC_1C_2L_1L_2}, \quad a_{i1} = \frac{U_2D}{(D-1)RC_1C_2L_2}, \\ a_{i2} &= \frac{U_g(L_1 + L_2)}{nC_2L_1L_2}, \quad a_{i3} = -\frac{U_2}{(1-D)RC_2} \\ b_{i0} &= \frac{(D-1)^2}{n^2C_1C_2L_1L_2}, \quad b_{i1} = \frac{1}{RC_1C_2} \left[\frac{(D-1)^2}{L_1} + \frac{D^2}{L_2} \right], \end{aligned}$$

$$b_{i2} = \frac{D^2(C_1 + n^2C_2)(L_1 + L_2) - (2D-1)(n^2C_2L_2 + C_1L_2 + C_1L_1)}{nC_1C_2L_1L_2},$$

$$b_{i3} = \frac{1}{RC_2}$$

3. II-SEPIC의 설계

표 1. 설계에 사용된 II-SEPIC의 규격

Spec.	Value
Input Voltage	20 [V]
Output Voltage	30 [V]
Power Rating	40 [W]
Output Current Range	0.5~1.3 [A]
Switching Frequency	100 [kHz]
$\Delta V_o/V_o$	1 [%]
$\Delta i_L/I_L$	60 [%]

연속 전류 모드가 되기 위한 인덕턴스의 값과 리플 전압을 고려한 C_1, C_2 의 크기는 다음과 같다.

$$L > \frac{(1-D)R_L}{fL} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{D}{fR_L \left(\frac{\Delta V_{c1}}{V_o} \right)} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \left(\frac{\Delta V_{c2}}{V_o} \right)} \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)에 의하여 $L = 500\mu H$, $C_1 = 4.3\mu F$, $C_2 = 1.25\mu F$ 을 선정하였다. II-SEPIC과의 비교를 위해 동일한 입, 출력 사양을 가진 I-SEPIC을 $L = 300\mu H$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 13\mu F$ 으로 설계하였다.^[7]

4. 제어 특성 해석

시스템의 특성을 확인하기 위해 II-SEPIC과 I-SEPIC의 근 궤적 (Root Locus)와 보데 선도 (Bode Plot)를 그리고 그 특성의 차이를 비교하였다.

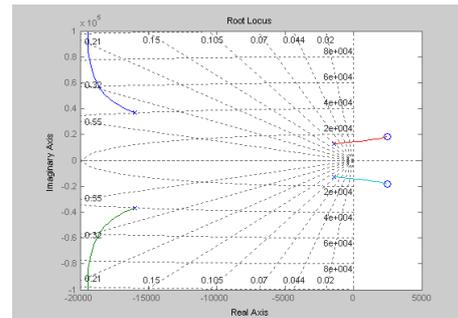


그림 3. II-SEPIC의 근 궤적

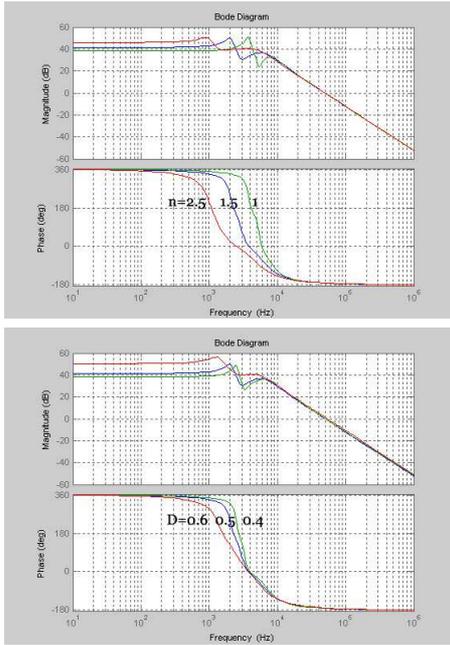


그림 4. 변압기 권선비와 듀티비의 변화에 따른 II-SEPIC의 보데 선도

그림 3과 그림 4에서 보여지듯이 II-SEPIC은 두 쌍의 극점이 s-평면의 LHP (Left Half Plane)에 위치해 있고, 특히 한 쌍의 극점은 시스템의 제어 특성에 큰 영향을 미치지 않을 정도로 LHP의 깊숙이 위치해 있으며, RHP (Right Half Plane)에 한 쌍의 영점을 가진 비최소위상 (Non Minimum Phase) 4차 시스템을 알 수 있다. 시스템의 공진 주파수는 변압기의 권선비와 듀티비에 관련이 있으며 권선비와 듀티비가 높아질수록 공진 주파수는 낮아진다.

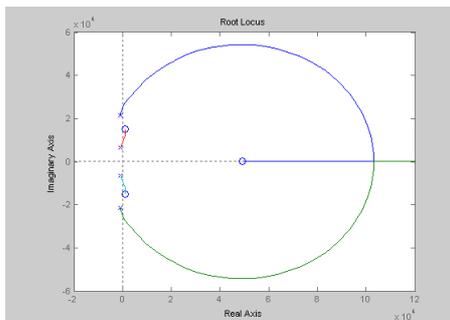


그림 5. I-SEPIC의 근 궤적

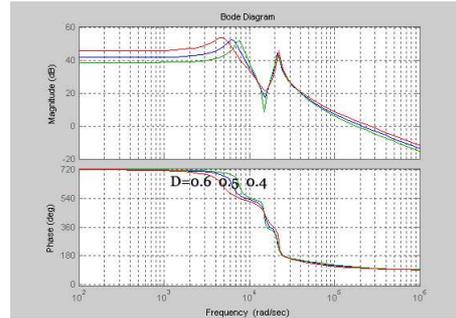
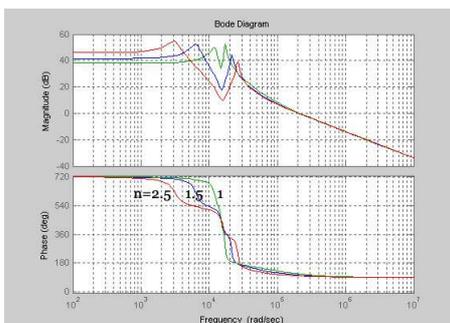


그림 6. 변압기 권선비와 듀티비의 변화에 따른 I-SEPIC의 보데 선도

I-SEPIC은 s-평면상의 안정 영역의 경계 부근에 두 쌍의 극점과 RHP에 한 쌍의 영점, 그리고 RHP 깊숙이 추가적인 한 개의 영점을 가진 비최소위상 4차 시스템이고 그림 6과 같이 II-SEPIC에 비해 부가적인 위상의 지연이 나타난다.

5. 결론

본 논문에서는 II-SEPIC의 정상 상태 해석을 통해 설계식을 유도하여 II-SEPIC을 설계하였고, 상태 공간 해석법을 이용한 동적 모델의 근 궤적 및 주파수 해석 결과에 근거, II-SEPIC과 I-SEPIC의 제어 특성을 비교하였다. II-SEPIC은 시스템의 모든 극점이 s-평면의 안정 영역에 위치해 있고, 한 쌍의 극점은 제어 특성에 미치는 영향이 적기 때문에 제어 시스템 설계에 있어 유연성을 가진다. 반면, I-SEPIC은 시스템의 극점과 영점이 s-평면상의 안정 영역의 경계 부근에 위치해 있고, II-SEPIC에 비해 부가적인 위상의 지연이 나타나므로 제어 시스템 설계에 있어 I-SEPIC에 비해 II-SEPIC이 상대적으로 장점이 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Jozwik, J.J. and Kazimierczuk, M.K., "Dual sepic PWM switching-mode DC/DC power converter", IEEE Transactions on, Volume 36, Issue 1, Feb.1989 Page(s):64 - 70
- [2] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers, 2001
- [3] Hren, A., Slibar, P., "Full order dynamic model of SEPIC converter", 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on, Volume 2, 20-23 June 2005 Page(s):553 - 558 vol.2
- [4] Hsiu, L., Kerwin, W., Witulski, A.F., "Small signal models of a zero-voltage-switched SEPIC dual converter with a coupled inductor", Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE 20-25 June 1994 Page(s):814 - 820 vol.2
- [5] Daniel W. Hart, Introduction to Power Electronics, Prentice Hall, 2000
- [6] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, Power Electronics, Devices, Converter, Application and Design, John Wiley & Sons, 2003
- [7] Maxim/Dallas Semiconductor, Application Note 1051; SEPIC Equations and Component Ratings, 2002