

입력 필터와 스위치 모드 전력 변환기의 상호 작용 해석 및 검증

이동규, 김동수, 최병조
 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

Analysis of Input Filter Interaction in Switching Power Converters

Donggyu Lee, Dongsoo Kim, and Byungcho Choi

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문에서는 입력 필터의 영향을 받는 스위칭 전력 변환기의 이론적인 해석 과정을 나타내었다. Middlebrook의 extra element theorem을 이용하여 이론적으로 입력 필터 상호 작용을 해석하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 전압 제어 및 전류 제어 방식 승압형 변환기를 제작하여 이를 검증하였다.

Keywords - input filter design, switching power converter, input filter interaction, extra element theorem

1. 서 론

입력 필터는 스위칭 전력 변환기의 동특성을 감소시키거나 동작을 불안정하게 한다. 이러한 입력 필터 상호 작용에 대한 해석은 Middlebrook에 의해서 오랫동안 연구되어 왔다^[1]. Middlebrook의 연구에서는 전압 제어 강압형 변환기에 대해서 제한적으로 입력 필터 상호 작용을 해석하였다. 그러나 해석 방법 자체는 모든 스위칭 전력 변환기에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 입력 필터에 의해 영향을 받고 있는 실제 스위치 모드 전력 변환기에 이러한 방법을 적용하여 해석하는 과정을 나타내었다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 입력 필터 상호 작용에 대한 이론적인 결과를 확인하였고, 전압 제어 및 전류 제어 방식 승압형 변환기를 제작하여 이론적인 해석 결과를 검증하였다.

2. 입력 필터가 존재하는 스위치 모드 전력 변환기의 동특성 해석

2.1 입력 필터 상호 작용에 대한 수식적 접근

그림 1은 입력 필터가 연결된 스위칭 전력 변환기에 대한 기능 블록도이다. 입력 필터가 포함된 스위칭 전력 변환기의 동특성은 1) 입력-대-출력 전달 함수(Input-to-output transfer function), A_u , 2) 출력 임피던스(Output impedance), Z_o , 3) 루프 이득(Loop gain), T_m , 4) 입력 필터의 입력 단에서 바라 본 입력

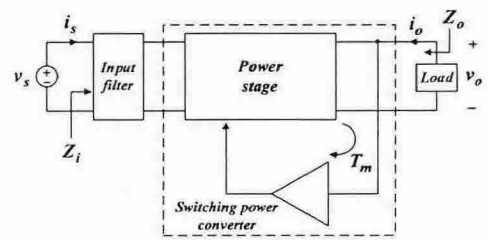


그림 1. 입력 필터가 연결된 스위칭 전력 변환기

표 1. 식 (1)-(4)에서 사용된 전달 함수의 정의

Transfer functions of stand-alone converter
A_{iC} : closed-loop input-to-output transfer function
Z_{oC} : closed-loop output impedance
Z_{iC} : closed-loop input impedance
Z'_{iC} : open-loop input impedance with output port shorted
Z''_{iC} : closed-loop input impedance with output voltage nullified
Z_{iC} : open-loop input impedance
T_{mC} : loop gain
Transfer functions of input filter
A_{ufo} : input-to-output transfer function with output port open
Z_{of0} : output impedance with input port shorted
Z_{iRco} : output impedance with input port open
Z_{iRo} : input impedance with output port open

임피던스(Input impedance), Z_i 를 포함한다. Middlebrook의 extra element theorem^[7,8]을 이용하면, 입력 필터가 연결된 스위칭 전력 변환기의 동특성은 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$A_u = A_{iC} A_{uRco} \frac{1}{1 + Z_{of0} / Z_{iC}} \quad (1)$$

$$Z_o = Z_{oC} \frac{1 + Z_{of0} / Z'_{iC}}{1 + Z_{of0} / Z_{iC}} \quad (2)$$

$$T_m = T_{mC} \frac{1 + Z_{of0} / Z''_{iC}}{1 + Z_{of0} / Z_{iC}} \quad (3)$$

$$Z_i = Z_{iRco} \frac{1 + Z_{of0} / Z_{iC}}{1 + Z_{of0} / Z'_{iC}} \quad (4)$$

수식 (1)-(4)는 단일 전력 변환기 또는 입력 필터의 동특성으로 구성된 부분과 분수식은 입력 필터의 상

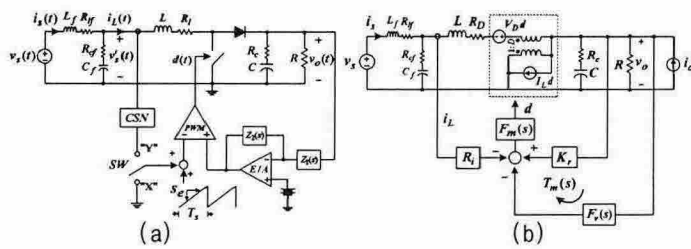


그림 2. 입력 필터가 연결된 승압형 변환기. (a) 기능 블록도. (b) 소신호 등가 모델.

호 작용에 의한 영향을 나타내고 있는 분수식으로 구성된다. 해석 과정의 편의를 위해서 수식 (1)-(4)의 특정 부분들을 아래와 같이 정의하였다.

- 곱셈 인자(Multiplication factors) :

$$\frac{1}{1+Z_{oF0}/Z_{iC}}, 1+Z_{oF0}/Z'_{iC}, 1+Z_{oF0}/Z''_{iC}, \frac{1}{1+Z_{oF0}/Z'''_{iC}}, 1+Z_{oF0}/Z_{iC} \text{ 부분.}$$

- 상호 작용 인자(Interaction factors) :

Z_{oF0}/Z_{iC} , Z_{oF0}/Z'_{iC} , Z_{oF0}/Z''_{iC} 및 Z_{oF0}/Z'''_{iC} 임피던스 비.

- 드라이빙 포인트 임피던스(Driving point impedance) : Z_{iC} , Z'_{iC} , Z''_{iC} 및 Z'''_{iC} 의 임피던스.

2.2 상호 작용 최소 조건

식 (2)로부터, 만일 모든 주파수 영역에 대하여 $|Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1$ 와 $|Z_{oF0}/Z'_{iC}| \ll 1$ 조건을 만족한다면, 입력 필터가 연결되더라도 변환기의 출력 임피던스는 변하지 않을 것임을 예상 할 수 있다. 동일한 방법으로, 모든 주파수 영역에 대해서 $|Z_{oF0}/Z''_{iC}| \ll 1$ 와 $|Z_{oF0}/Z'''_{iC}| \ll 1$ 조건을 만족한다면, 루프 이득은 입력 필터에 의한 영향을 받지 않을 것이다.

그러나 실제로 모든 주파수 영역에 대해서 위의 조건을 만족하는 것은 불가능하며^[1, 2], 따라서 입력 필터가 연결된 스위칭 전력 변환기는 입력 필터에 의해서 영향을 받게 된다.

2.3 불안정 요인

입력 필터가 존재하는 스위칭 전력 변환기의 동특성 수식에서 곱셈 인자 $1+Z_{oF0}/Z_{iC}$ 는 입력-대-출력 전달 함수와 출력 임피던스의 분모항에, 그리고 입력 임피던스의 분자항에 존재한다. 즉, $1+Z_{oF0}/Z_{iC}=0$ 의 근은 변환기의 추가적인 극점이 되며, 나이퀴스트(Nyquist) 안정도 평가법을 이용하여 전체 시스템의 안정도를 평가 할 수 있다. 따라서 임피던스 비 Z_{oF0}/Z_{iC} 가 나이퀴스트 안정도 조건을 위배하면 전체 시스템은 불안정한 특성을 나타낸다.^[1, 6]

3. 전압 제어 방식 승압형 DC-DC 변환기

본질적으로 입력 필터에 대한 해석은 상호 작용 인

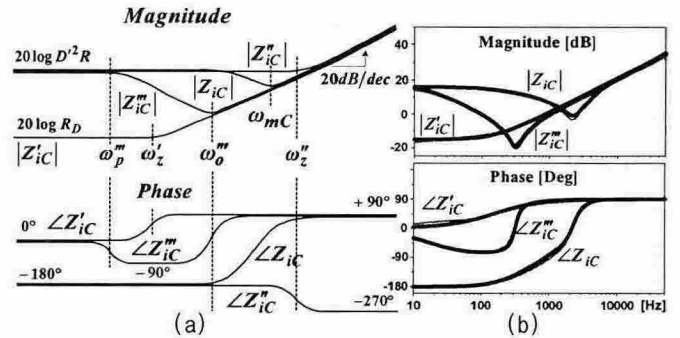


그림 3. 전압 제어 방식 승압형 변환기의 드라이빙 포인트 임피던스. (a) 이론적인 점근선도. (b) 시뮬레이션 결과 및 측정 결과.

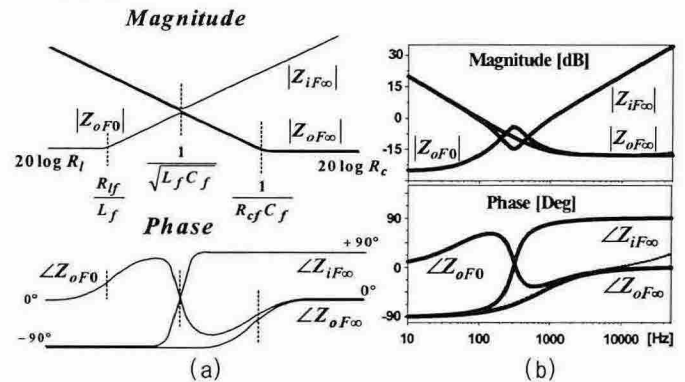


그림 4. 입력 필터의 전달 함수. (a) 이론적인 점근 선도. (b) 시뮬레이션 결과 및 측정 결과.

자 또는 곱셈 인자의 영향을 관찰하는 것이다. 이 장에서는 전압 제어 방식 승압형 DC-DC 변환기에 대해서 앞서 언급한 입력 필터 상호 작용을 해석 할 것이다. 그림 2(a)는 폐루프 제어를 하는 승압형 DC-DC 변환기의 기능 블록도이며, 그림 2(b)는 그림 2(a)에 대한 소신호 등가 모델이다. 그림 2를 전압 제어 방식에 대해 적용하기 위해서는 스위치 “SW”는 “X” 위치에 연결하고, $R_i=s_n=s_f=0$ 을 적용하면 된다.

3.1 드라이빙 포인트 임피던스 및 필터 전달 함수

그림 3은 전압 제어 방식 승압형 변환기에 대한 드라이빙 포인트 임피던스이다. 굵은 선은 시뮬레이션 결과이며, 실선은 측정 결과이다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 단일 변환기의 입력 임피던스 Z_C 는 변환기의 크로스오버 주파수 이전까지는 $-D'^2R$ 의 부저항 특성을 나타낸다. 그림 4는 단일단 입력 필터 전달 함수의 이론적인 결과 및 측정 결과이다.

3.2 안정도 해석

변환기의 입력 임피던스가 부저항의 특성을 나타내는 주파수 영역에서 $|Z_{oF0}|_{\text{peak}}$ 가 단일 변환기의 입력 임피던스와 겹쳐질 때, 전체 시스템은 불안정한 특성을 나타낸다^[1]. 단일 변환기의 입력 임피던스와 입력 필터의 입력 임피던스가 겹쳐지는 영역이 점차 저주파로 향함에 따라, 임피던스 비 Z_{oF0}/Z_{iC} 의 극좌표 선

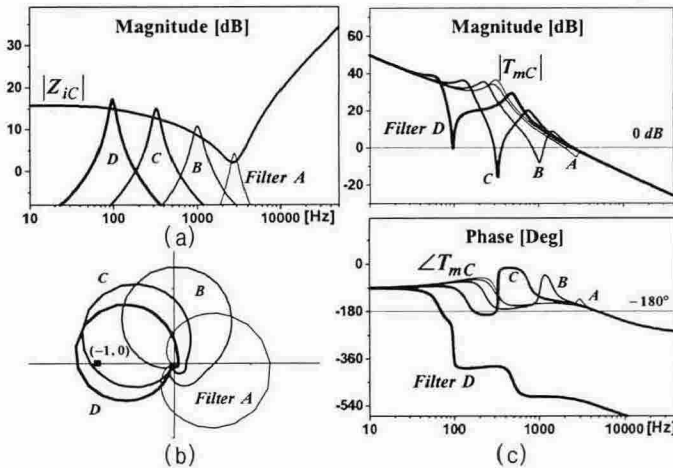


그림 5. 전압 제어 승압형 변환기의 안정도 해석. (a) $|Z_{oF0}|$ 와 $|Z_{iC}|$ 의 보드 선도. (b) Z_{oF0}/Z_{iC} 의 극좌표 선도. (c) 루프 이득, T_m

도는 반시계 방향으로 회전한다. 여기서 입력 필터 C와 D의 극좌표 선도는 (-1,0)지점을 포함하므로 전체 시스템은 불안정한 동작 특성을 나타낼 것이다. 이것은 그림 5(c)를 통해서도 확인 할 수 있다.

실제 응용에서 $|Z_{oF0}|_{peak}$ 는 T_{mC} 의 0-dB 크로스오버 주파수 아래에 위치한다. 따라서 입력 필터가 연결된 스위치 모드 전력 변환기가 안정되게 동작하기 위해서는 $|Z_{oF0}|_{peak} < D'^2R$ 조건을 만족해야 한다. 그리고 실제 응용에서는 $|Z_{oF0}|_{peak} \ll D'^2R$ 조건이 사용되며, 이러한 기준은 변환기의 동작 조건 및 입력 필터 변수의 오차 변화에도 전체 시스템의 안정된 동작 특성 및 페루프 특성을 보장한다.

3.3 입력 필터 상호 작용 해석

그림 6은 입력 필터가 연결된 전압 제어 방식 승압형 변환기의 소신호 동특성을 나타낸다. 입력 필터는 모든 주파수 영역에 대해서 오직 $|Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1$ 와 $|Z_{oF0}/Z_{iC}''| \ll 1$ 조건을 만족하도록 설계되었으며, 특정 주파수 영역에 대해서만 $|Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1$ 와 $|Z_{oF0}/Z_{iC}'''| \ll 1$ 조건을 만족한다.

앞서 언급한 식 (1)에 의해 주어진 입력-대-출력 전달 함수는 $|Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1$ 조건에 의해 간략하게 표현된다.

$$A_u \approx A_{uF0} A_{iC} \quad (5)$$

입력-대-출력 전달 함수와 동일하게 출력 임피던스도 $|Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1$ 조건을 이용하면 아래와 같이 간략하게 표현된다.

$$Z_o \approx \begin{cases} Z_{iC} & \text{at frequencies where } |Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1 \\ Z_{iC} \frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}} & \text{at frequencies where } 1 \ll |Z_{oF0}/Z_{iC}| \end{cases} \quad (6)$$

동일하게, 변환기의 루프 이득은 조건에 따라서 아래와 같이 표현 할 수 있다.

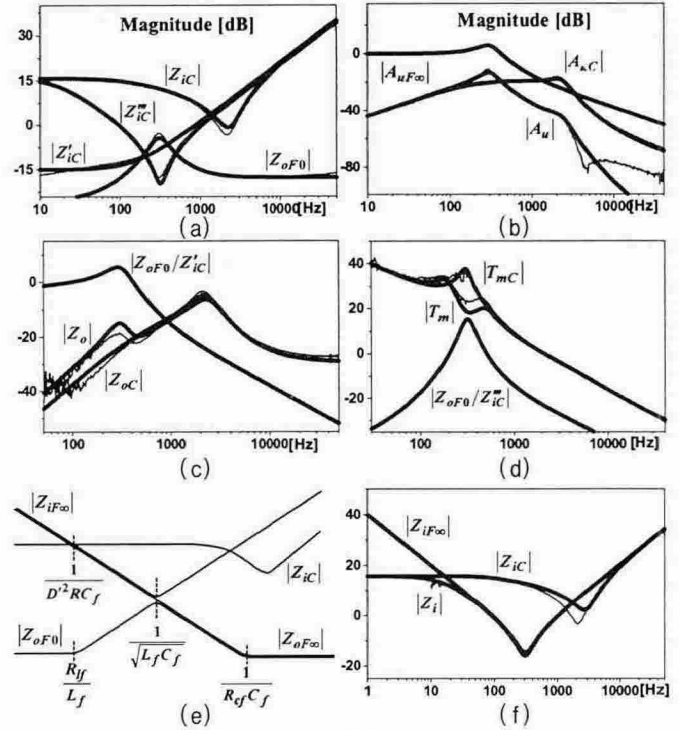


그림 6. 전압 제어 방식 승압형 변환기의 전달 함수. (a) 드라이빙 포인트 임피던스. (b) 입력-대-출력 전달 함수. (c) 출력 임피던스. (d) 루프 이득. (e) 입력 필터 전달 함수의 점근선도. (f) 입력 임피던스.

$$T_m \approx \begin{cases} T_{mC} & \text{at frequencies where } |Z_{oF0}/Z_{iC}| \ll 1 \\ \frac{T_{mC}}{|Z_{oF0}/Z_{iC}|} & \text{at frequencies where } 1 \ll |Z_{oF0}/Z_{iC}| \end{cases} \quad (7)$$

입력 임피던스는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Z_i \approx \begin{cases} \frac{Z_{iF0}}{|Z_{oF0}/Z_{iC}|} & \text{at frequencies where } |Z_{iC}| \ll |Z_{oF0}| \\ Z_{iF0} & \text{at frequencies where } |Z_{oF0}| \ll |Z_{iC}| \end{cases} \quad (8)$$

그림 6에서 확인 할 수 있듯이, $\omega_L = 1/D'^2RC_f$ 아래의 주파수 영역에서는 임피던스 Z_{iF0} 와 Z_{oF0} 은 같다. 따라서 식 (8)은 더욱 간단하게 표현된다.

$$Z_i \approx \begin{cases} Z_{iC} & \text{for } \omega_L < \omega \\ Z_{iF0} & \text{for } \omega < \omega_L \end{cases} \quad (9)$$

사실상 수식 (9)에 의해 논의된 입력 임피던스는 $-D'^2R$ 의 부저항을 부하로 가지는 입력 필터의 입력 임피던스와 동일하다. 따라서 단일 승압형 변환기의 소신호 특성은 $R_{eq} = -D'^2R$ 로서 대체될 수 있다.

4. 전류 제어 방식 승압형 DC-DC 변환기

전류 제어 방식 승압형 변환기도 그림 2(b)를 사용하여 전압 제어 방식과 동일한 방법으로 해석 할 수 있다.

4.1 드라이빙 포인트 임피던스 해석

전류 제어 방식에 대한 입력 필터 상호 관계는 다음과 같이 정리된다.

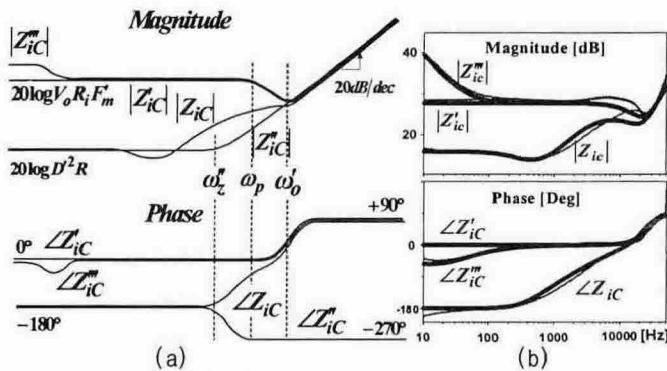


그림 7. 전류 제어 방식 승압형 변환기의 드라이빙 포인트 임피던스. (a) 이론적인 점근 선도. (b) 시뮬레이션 결과 및 측정 결과.

- 1) 저주파 영역 및 중간 대역 주파수 영역에서는 $|Z_{ic}| \approx |Z'_{ic}| \ll |Z''_{ic}| \approx |Z'''_{ic}|$ 조건에 의해서 $|Z_{ic}|$ 및 $|Z'_{ic}|$ 의 최소값은 증가된다. 따라서, $|Z_{oF0}|_{peak}$ 가 $|Z_{ic}|$ 또는 $|Z'_{ic}|$ 보다 작다면, 곱셈 인자는 1 근처의 값을 가지게 되며, 입력 필터에 의한 상호 작용은 무시할 수 있다.
- 2) 입력 필터의 출력 임피던스 최대값 $|Z_{oF0}|_{peak}$ 가 $\angle Z_{ic} \approx \angle Z'_{ic} \approx -180^\circ$ 위상 상태를 가지는 주파수 영역에서 $|Z_{ic}|$ 와 $|Z'_{ic}|$ 에 근접해 간다면, 입력 필터에 의한 큰 영향을 받게 될 것이다.
- 3) $|Z_{oF0}|_{peak}$ 가 $|Z_{ic}|$ 또는 $|Z'_{ic}|$ 보다 커지는 경우에 변환기는 불안정해진다. 즉, 전체 시스템의 안정도를 보장하는 $|Z_{oF0}| < |Z_{ic}| \approx |Z'_{ic}|$ 조건을 피해서 입력 필터가 설계된다면, 입력 필터에 의한 영향은 나타나지 않는다.

4.2 입력 필터 설계

입력 필터 상호 작용을 최소화 하기 위해서는 $|Z_{oF0}|_{peak} \ll D'^2 R$ 를 만족하는 입력 필터를 설계해야 한다. 그리고 전압 제어 방식과 비교해 볼 때, 전류 제어 방식에서 $|Z_{oF0}|_{peak} \ll D'^2 R$ 조건을 만족하는 입력 필터의 설계는 더욱 쉽다.

5. 결 론

Middlebrook은 전압 제어 방식 강압형 변환기에 대해 제한적으로 입력 필터 상호 작용을 해석하였다. 그러나 해석 방법 그 자체는 모든 스위칭 전력 변환기에 적용할 수 있다. 이러한 관점에서, 본 논문에서는 실제 스위칭 전력 변환기의 입력 필터 상호 작용에 대해서 이론적인 해석 및 실험을 통한 검증을 하였다.

전류 제어 방식 승압형 변환기에 대해 고려한 본 논문의 결론은 대부분의 승압형 변환기에 대해서 적용할 수 있다. 그러나 드라이빙 포인트 임피던스의 형태가 다른 전류 제어 방식 DC-DC 변환기에 적용하

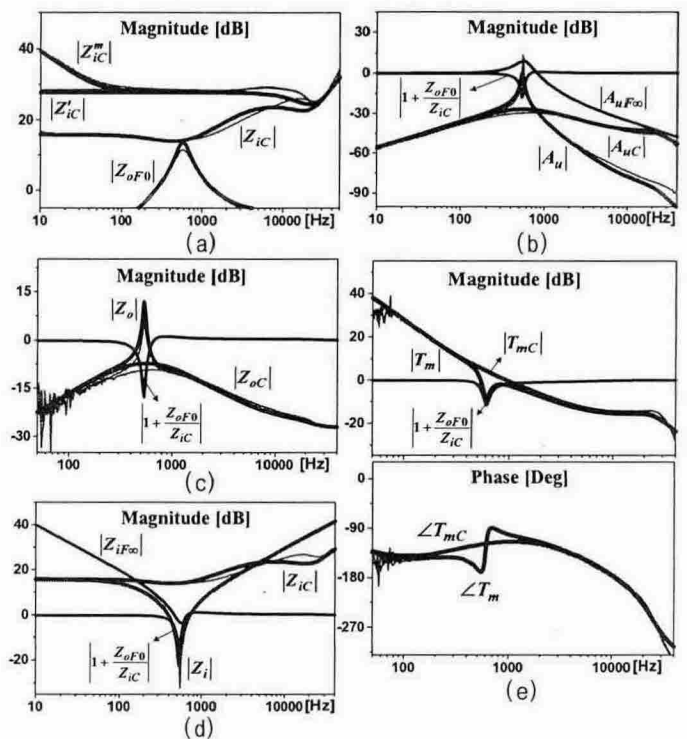


그림 9. 전류 제어 방식 승압형 변환기의 전달 함수. (a) 드라이빙 포인트 임피던스. (b) 입력-대-출력 전달 함수. (c) 출력 임피던스. (d) 입력 임피던스. (e) 루프 이득

는 것은 적합하지 않다. 따라서 앞으로 전류 제어 방식 강압형 변환기 및 강/승압형 변환기에 대한 입력 필터 상호 관계에 대한 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Middlebrook, "Input filter considerations in design and application of switching regulators," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1976, pp. 366-382.
- [2] S. Y. Erich and W. M. Polivka, "Input filter design for current-programmed regulators," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, pp. 143-151, Jan. 1992.
- [3] C. H. Kohut, "Input filter design criteria for switching regulator using current-mode programming," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, pp.469-479, May. 1992.
- [4] Y. Jang and R. W. Erickson, "Physical origin of input filter oscillations in current programmed converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, pp. 725-733, July 1992.
- [5] T. Suntio, I. Gadoura, and K. Zenger, "Input filter interactions in peak-current-mode-controlled buck converter operating in CICM," IEEE Trans. Industrial Electron., vol. 49, pp. 76-86, Feb. 2002.
- [6] T. Suntio, I. Gadoura, and K. Zenger, "Input filter interactions in current-mode controlled converter-a unified approach," in Proc. IEEE IECON, 2002, pp. 1179-1184.
- [7] R. D. Middlebrook, V. Vorperian, and J. Lindal, "The N extra element theorem," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 45, pp. 919-935, Sept. 1998.