입력 필터단이 연결된 전류 제어 DC-DC 변환기의 동특성

김동수, 이동규, 최병조
경북대학교 전자전기컴퓨터 공학부

Dynamics of Current-Mode-Controlled DC-to-DC Converters With Input Filter Stage

Dongsoo Kim, Donggyu Lee, and Byungcho Choi
School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문은 입력 필터 상호 작용 (Interacton)의 일반적인 해석 방법으로 입력 필터단이 연결된 전류 제어 DC-DC 변환기의 동특성을 해석한다. 또한 입력 필터단의 강한 영향을 받는 상태의 전류 제어 강압형 변환기의 새로운 소신호 해석 결과를 제시한다. 이론적 해석은 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 제작된 실험용 PWM DC-DC 변환기로 검증하였다.

1. 서 론

입력 필터단이 연결된 전류 제어 펄스 폭 변조 (PWM) 변환기의 동특성 해석은 입력 필터단이 변환기의 동특성을 변화시켜 시스템의 안정성에도 영향을 미치며, 전류 제어 변환기에서의 입력 필터 상호 작용이 전압 제어 변환기에서의 상호 작용과 크게 다른 양상을 보이기 때문에 이미 많은 논문에서 다루어 왔다. 전압 제어 변환기에 대한 Middlebrook이 제안한 해석 방법[1]을 y-parameter 전류 제어 PWM 변환기 모델에 적용하여 동특성을 해석한 논문에서는 시스템을 거의 불안정하게 만드는 입력 필터에 의해서도 전압 루프 이득과 출력 임피던스가 큰 영향을 받지 않음을 주장했고, 이 현상을 근거로 불안정 요인이 인덕터 전류의 부궤환 (Feedback)에 의해서 발생하는 피드백/피드포워드 루프에 있음을 주장한 논문도 있다.

많은 연구 결과에도 불구하고, 아직 입력 필터단이 연결된 전류 제어 PWM 변환기의 동특성 해석은 완전히 해명되지 못했다. 따라서 본 논문에서는 입력 필터의 강한 영향을 받는 상태의 전류 제어 PWM 변환기의 동특성 해석에 새로운 시각을 제시한다. 입력 필터 상호 작용에 대한 일반적인 해석방법을 단일화된 (Unified) 전류 제어 모델에 적용하여 앞서 보고된 동특성에 대한 해석을 제시한다. 또한 전류 제어 강압형 변환기의 새로운 소신호 결과를 제시한다.

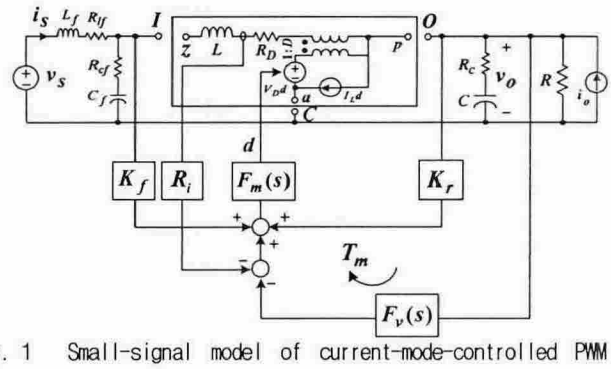

Fig. 1 Small-signal model of current-mode-controlled PWM converters combined with single-stage input filter.

2. 전류 제어 변환기의 성능 평가 기준

그림 1은 전력단의 PWM 스위치에 단일화된 전류 제어 모델[2]을 적용한 소신호 모델이다. 입력 필터단이 연결된 DC-DC 변환기의 성능평가의 기준은 1) 입력대 출력 전달 함수 $A_v = v_o(s)/v_s(s)$, 2) 출력 임피던스 $Z_o = v_o(s)/i_o(s)$, 3) 루프 이득 T_m, 4) 입력 임피던스 $Z_i = v_s(s)/i_s(s)$ 이다. 표 1의 4가지 동특성은 Middlebrook의 EET (Extra element theorem)[3]로 유도된 수식이며, 이를 통해 입력 필터단이 변환기에 어떤 영향을 미치는지를 잘 알 수 있다. 각 수식의 첫 번째 항은 변환기 또는 입력 필터단의 전달 함수이며, 분수항은 입력 필터의 영향을 나타낸다. 따라서 각 분수항은 상호 작용 인자 (Interaction factor)라 정의하며, Z_{iC}, Z'_{iC}, Z''_{iC}, Z'''_{iC}를 동작점 임피던스(Driving Point Impedance)라 정의한다.

3. 전류 제어 강압형 변환기의 동특성

그림 1에서 a-I, p-C, z-O이 연결되면 전류 제어 강압형 변환기가 된다.

Table 1

Performance Criteria for Converter with Input Filter.

$$A_u = A_{uF\infty}\, A_{uC}\, \frac{1}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}} \qquad Z_o = Z_{oC}\, \frac{1+\frac{Z_{oF0}}{Z'_{iC}}}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}}$$

$$T_m = T_{mC}\, \frac{1+\frac{Z_{oF0}}{Z'_{iC}}}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z''_{iC}}} \qquad Z_i = Z_{iF\infty}\, \frac{1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}}$$

Transfer functions of stand-alone convert

A_{uC} : 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 filt

$A_{uF\infty}$: input-to-output transfer function with output port open

Z_{oF0} : output impedance with input port shorted

$Z_{oF\infty}$: output impedance with input port open

$Z_{iF\infty}$: input impedance with output port op

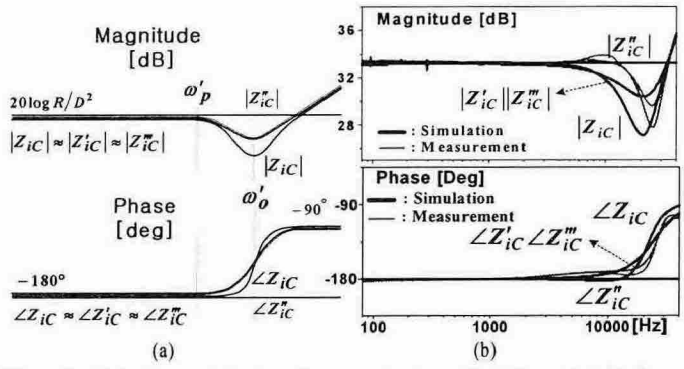

Fig. 2. Driving point impedances of current-mode-controlled buck converter. (a) Theoretical asymptotic plots. (b) Measured and simulated impedances.

3.1 동작점 임피던스

EET를 이용하여 동작점 임피던스들을 유도하고, 간략화, 근사화 시키면 그림 2(a)의 보드 선도를 얻을 수 있다. 그림 2(b)는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실제 제작된 강압형 변환기를 HP4194A 임피던스 분석기를 이용하여 측정한 결과이다. 이론치, 시뮬레이션, 측정치를 통해서 동작점 임피던스가 저주파에서 모두 $-R/D^2$ 로 수렴함을 볼 수 있다.

3.2 입력 필터단의 동적 상호 작용

그림 3은 실험용 강압형 변환기의 전달함수를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 3(a)는 동작점 임피던스

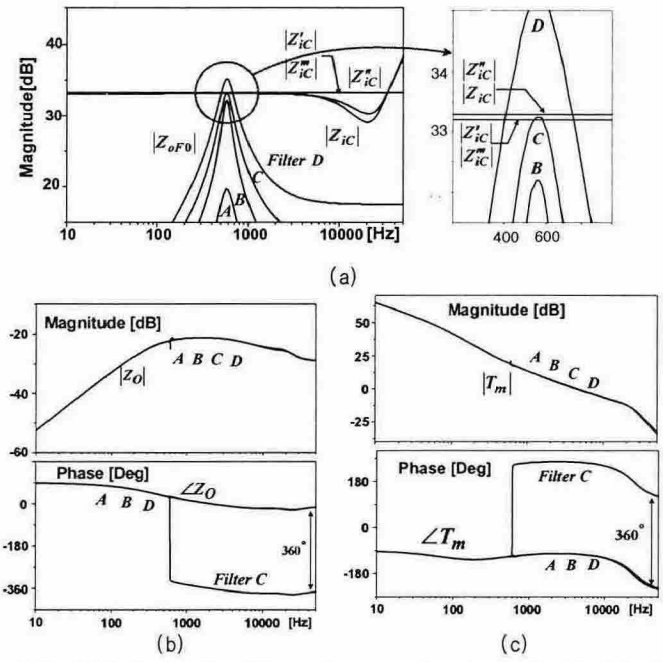

Fig. 3.Transfer functions of current-mode-controlled buck converter. (a) Driving point impedances and input filter output impedance. (b) Output impedance. (c) Loop gain.

와 서로 다른 4가지 입력 필터의 출력 임피던스 Z_{oF0}이다. 입력 필터의 출력 임피던스 최고점 $|Z_{oF0}|_{peak}$이 동작점 임피던스에 접근하거나 넘어서게 되면 상호 작용 인자가 변환기에 영향을 미치게 된다. 표 2는 각각의 입력 필터가 연결된 강압형 변환기에서의 상호 작용 인자의 영향과 시스템의 안정성을 보여준다.

비록 동작점 임피던스의 크기가 저주파에서 $20\log R/D^2$ 로 수렴하지만, 확대해 보면 그림 3(a)처럼 $|Z'_{iC}| \approx |Z'''_{iC}| < |Z_{iC}| \approx |Z''_{iC}|$의 크기 관계를 가진다. $|Z_{oF0}|_{peak}$가 이 크기 사이에 들어가면 강압형 변환기의 위상에 특이한 동작이 일어나며, 필터 C는 이것을 설명하기 위해서 특별히 선택된 것이다.

그림 3(b)에서 출력 임피던스의 크기는 시스템이 안정한 상태 (필터 A)에서 불안정한 상태 (필터 D)로 변하더라도 입력 필터에 의한 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 위상은 필터 C에서 발생하는 RHP 이중 영점에 의해서 -360° 변화가 생기며, 아직은 안정된 상태를 유지한다. 필터 D가 연결되면 RHP 이중 극점이 발생하게 되어 결국 불안정하게 되지만, 위상은 RHP 이중 영점, 극점이 서로를 상쇄시켜 안정된 상태의 모양과 같게 된다. 다시 말하면 필터 D가 연결된 상태에서 출력 임피던스의 분수 항이 1이 되어 입력 필터의 영향을 제거하여 불안정해져도 그 현상이 쉽게 관찰되지 않는다.

Table 2. Impacts of Interaction factors on Performance Criteria for Converters.

Multiplication Factor	$\frac{1}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}}$	$1+\frac{Z_{oF0}}{Z'_{iC}}$	$1+\frac{Z_{oF0}}{Z''_{iC}}$	$\frac{1}{1+\frac{Z_{oF0}}{Z''_{iC}}}$	$1+\frac{Z_{oF0}}{Z_{iC}}$	
Filter A						Stable
Filter B						
Filter C		RHP Double zero		RHP Double pole		
Filter D	RHP Double pole	RHP Double zero	RHP Double zero	RHP Double pole	RHP Double zero	Unstable
Performance Criteria	$A_u(s)$ / $Z_o(s)$		$T_m(s)$		$Z_i(s)$	Stability

그림 3(c)의 루프 이득에서 발생하는 현상도 똑같이 설명될 수 있다.

결론적으로 동작점 임피던스가 저주파에서 모두 같은 값으로 수렴하기 때문에 루프 이득과 출력 임피던tm의 크기는 변하지 않으며, 불안정해지기 전 경계에서 갑작스런 위상 변화를 겪으며, 특히 불안정해지면 아무런 표시도 볼 수 없게 된다. 이로서 앞에서 언급했던 "루프 이득과 출력 임피던스가 필터에 영향을 거의 받지 않는다."는 사실을 확인할 수 있으며, 기존의 사실을 보충, 보완할 수 있다.

3.3 불안정성 요인

Z_{oF0}/Z_{iC}이 Nyquist 안정 조건을 위배할 때만 불안정해진다. 예를 들어 표 2를 보면 필터 C에 의해서도 RHP 이중 극점이 생기지만 결국 Z_{oF0}/Z_{iC}가 Nyquist 안정 조건을 위배하는 필터 D에서만 불안정하게 된다.

3.4 변환기 동특성의 실험 및 검증

그림 4는 안정한 영역 내에 있는 필터 A가 연결된 변환기와 불안정해지기 전 경계에 있는 필터 C가 연결된 실험용 강압형 변환기에서 실제로 측정한 각각의 루프 이득, 출력 임피던스, Z_{oF0}/Z_{iC}의 극좌표 선도, 스텝 부하 응답 결과이다. 실험 결과들은 앞서 주장한 내용들을 잘 검증해준다.

4. 결 론

입력 필터 상호 작용에 대한 일반적인 해석방법을 전류 제어 PWM 변환기에 적용하고, 실제로 입력 필터단이 연결된 전류 제어 강압형 변환기의 동특성을 해석해 보았다.

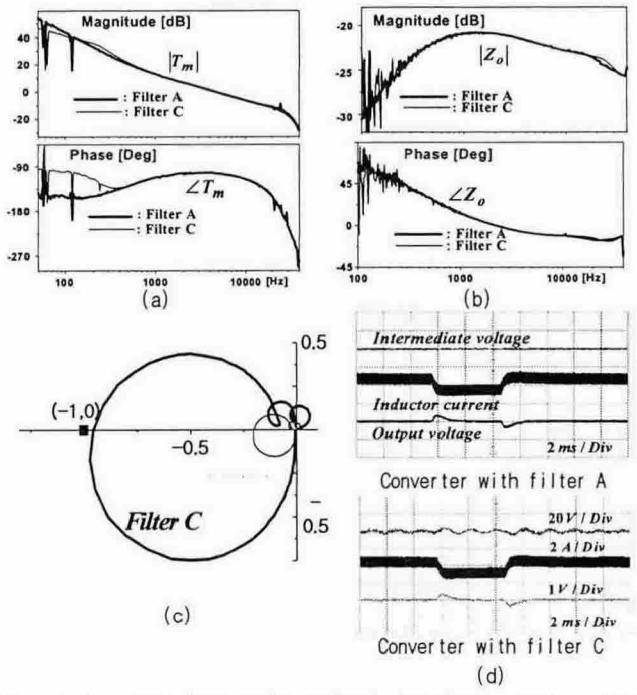

Fig. 4.Measured loop gain, output impedance, polar plot of Z_{oF0}/Z_{iC}, and step load response. (a) Loop gain. (b) Output impedance. (c) Polar plot for Z_{oF0}/Z_{iC}. (d) Step load response.

비록 모든 스위치 모드 전력 변환기에 똑같은 방식으로 적용하여 해석할 수 있지만, 그 양상은 동작점 임피던스의 특징에 따라 달라지게 된다. 그러므로 동작점 임피던스가 입력 필터 상호 작용 해석에 중요한 요인이 되며 또한 입력 필터 설계의 지침이 된다.

이 논문은 대학 IT연구센터 육성지원사업의 연구결과로써 HY-SDR 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] R. D. Middlebrook, "Input filter considerations in design and application of switching regulators," IEEE Power Electronics Specialist Conf. Rec., 1985, pp.716-732.

[2] F. D. Tan, and R. D. Middlebrook, "A unified model for current-programmed converters," IEEE Trans. Power Electron. vol.10, pp.271-280, July 1995.

[3] 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.