

외부 임피던스를 고려한 Boost PFC 안정도 분석

양동혁, 최덕관, 신종원*, 최병조**
 현대모비스, 중앙대학교*, 경북대학교**

Stability Analysis of Boost PFC Considering the External Impedance

Donghyuk Yang, Deokkwan Choi, Jongwon Shin*, Byungcho Choi**
 Hyundai Mobis Co. Ltd., Chung-Ang University*, Kyungpook National University**

ABSTRACT

전기자동차에 탑재된 충전시스템(On-board-charger, OBC)은 다양한 충전환경에서도 동작하여야 한다. 따라서 충전시스템이 동작할 수 있는 임피던스 사양에 대한 분석이 요구된다. 주로 외부 환경과 연결되어 있는 PFC 컨버터가 시스템 안정도에 큰 영향을 미치므로 외부 임피던스와 EMI 필터, PFC 컨버터 사이의 임피던스 관계를 이용하여 안정도 분석을 진행하였다. 분석 내용을 SIMPLIS Technologies社의 SIMPLIS V9.1 시뮬레이션을 통해 분석 결과를 검증하였다.

1. 서론

전기자동차에 탑재된 충전시스템은 일반적으로 그림 1과 같이 전자파 규제 만족을 위한 EMI 필터, 역률 보상을 위한 PFC 회로, 넓은 출력 전압 범위를 만족하기 위한 DC-DC 회로 등 3가지 구성 요소로 이루어져 있다.

전기자동차는 상황에 따라 다양한 충전소에서 충전을 한다. 따라서 전기자동차의 충전시스템은 일반적인 전력변환장치와 달리 다양한 외부 임피던스(그림 1의 External 블록)를 경험하게 된다. 이와 같은 외부 임피던스는 충전시스템의 응답 특성과 안정도에 영향을 미치므로, 충전시스템의 신뢰성 확보를 위해 외부 임피던스에 따른 안정도를 판별해야 한다.

본 논문에서는 간결한 해석을 위해 충전시스템 내의 DC-DC 회로 안정도는 확보되었다고 가정한 후 외부 임피던스, EMI 필터, 부스트(Boost) PFC로 이루어진 시스템에 대한 안정도를 해석한다. 구체적으로, R. D. Middlebrook의 연구^[1]와 같이 외부 임피던스와 EMI 필터를 포함한 입력의 출력 임피던스와 부스트 PFC의 입력 임피던스 사이의 관계를 이용하여 안정도를 판별한다.

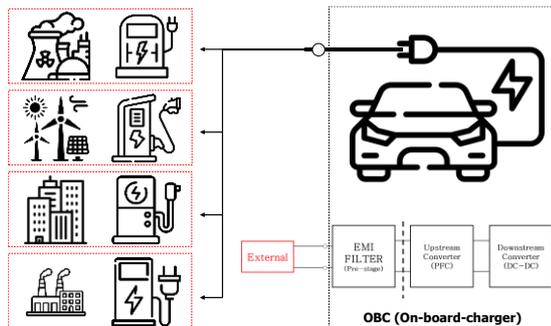


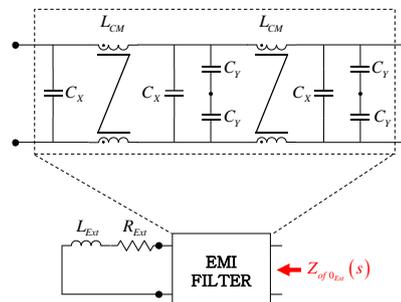
그림 1. 외부 임피던스가 연결된 OBC 시스템

2. 입력 필터가 결합된 컨버터의 안정도 판별 기준

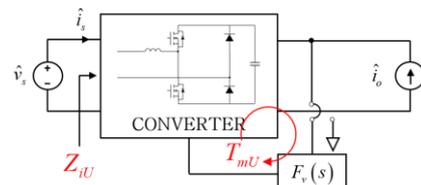
입력 필터 상호 작용의 해석은 외부 임피던스가 포함된 EMI 필터의 출력 임피던스 $Z_{of0_{Ext}}(s)$ 와 입력에 이상적인 전압원, 출력에 이상적인 전류원이 연결된 컨버터의 입력 임피던스 $Z_{iU}(s)$ 의 관계를 이용한다^[5]. 이러한 임피던스 도식을 그림 2에 나타내었다.

시스템의 안정도는 새로운 특성방정식으로 정의된다. 식 (1)에서의 $T_{mU}(s)$ 는 $Z_{iU}(s)$ 와 마찬가지로 이상적인 입출력을 갖는 컨버터의 루프 이득을 의미한다. 입력단 임피던스의 영향에 의한 안정도 분석을 위해 $T_{mU}(s)$ 는 안정하다고 가정하고 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 을 해석한다. 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 또한 종래의 루프 이득과 같은 방법으로 안정도 판별을 하면 된다.

$$[1 + T_{mU}(s)] \left[1 + \frac{Z_{of0_{Ext}}(s)}{Z_{iU}(s)} \right] = [1 + T_{mU}(s)] [1 + T_{mm}(s)] \quad (1)$$



(a) 외부 임피던스가 포함된 EMI 필터의 출력 임피던스 $Z_{of0_{Ext}}(s)$



(b) 컨버터의 입력 임피던스 $Z_{iU}(s)$

그림 2. 임피던스 도식

3. 임피던스 해석

3.1 시스템 정의

본 논문에서는 해석의 편의를 위해 OBC 시스템에서 외부 임피던스와 EMI 필터, 부스트 PFC만을 고려한다.

EMI 필터는 그림 2(a)의 2단 PI 필터를 이용한다. CM 필터로 이루어진 2단 PI 필터를 이용한다. EMI 필터와 관련된 제정수는 표 1에 나타내었다.

부스트 PFC는 그림 3과 같이 브릿지리스 토템 폴 부스트(Bridgeless totem pole boost) PFC 컨버터를 이용한다. 부스트 PFC와 관련된 제정수는 표 3에 나타내었다.

전류제어 및 전압제어를 위한 보상기는 Type II 보상기를 이용하였다. 보상기와 관련된 제정수는 표 3에 나타내었다.

3.2 외부 임피던스 고려된 EMI 필터 출력 임피던스

전력변환장치에서의 안정도 해석은 입출력이 루프를 형성하는 상황에서 정의된다. EMI 필터에서는 DM 노이즈가 형성하는 루프가 안정도에 영향을 미친다. 따라서 입력의 EMI 필터 관점에서는 입력 전압이 루프를 형성하는 소자만을 고려한다. 즉, DM 노이즈와 관련된 X-커패시터만을 고려한다.

표 1. EMI 필터 제정수

변수	값	단위	변수	값	단위
C_X	2.2	μF	R_{Cx}	1	m Ω
C_Y	47	nF	R_{Lcm}	10	m Ω
L_{CM}	2	mH			

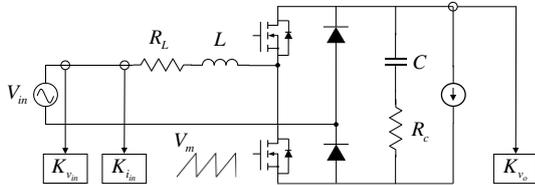


그림 3. 브릿지리스 토템 폴 부스트 PFC 컨버터

표 2. 부스트 PFC 제정수

변수	값	단위	변수	값	단위
Power	7.4	kW	L	200	μH
V_{in_rms}	220	V	R_L	5	m Ω
$F_{V_{in}}$	50	Hz	C	900	μF
V_o	400	V	R_C	22	m Ω
I_o	18.5	A	V_m	10	V
$K_{V_{in}}$	5	mV/V	F_{sw}	55	kHz
$K_{I_{in}}$	30	mV/A	K_{V_o}	3.5	mV/V

표 3. 보상기 제정수

전류제어기			전압제어기		
변수	값	단위	변수	값	단위
K_{F_i}	85000	(없음)	K_{F_v}	20	(없음)
$\omega_{F_{i,z}}$	$1 \cdot 2\pi$	krad/s	$\omega_{F_{v,z}}$	$10 \cdot 2\pi$	rad/s
$\omega_{F_{i,p}}$	$5 \cdot 2\pi$	krad/s	$\omega_{F_{v,p}}$	$37.5 \cdot 2\pi$	krad/s
$\omega_{F_{i,crossover}}$	$7.15 \cdot 2\pi$	krad/s	$\omega_{F_{v,crossover}}$	$2 \cdot 2\pi$	rad/s
Type II 보상기 전달함수	$F_{comp}(s) = K_{F_{comp}} \frac{1}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{F_{comp,z}}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{F_{comp,p}}}\right)}$				

3.3 부스트 PFC 컨버터 입력 임피던스

부스트 PFC 입력 임피던스를 도출하기 위한 제어 블록도는 그림 4에 도시하였다. PFC 입력 임피던스는 전류 제어 루프 $T_i(s)$ 에 의한 영향을 받는다.

전압 제어 루프는 교차주파수가 스위칭 주파수 대비 매우 저주파에 위치하여 있으므로, 영향이 없다고 가정한다.

식 (2)-(6)에 전류 제어 루프 이득과 입력 임피던스 관계식을 표현하였다. 교차주파수 이후 부스트 PFC 인덕턴스 L 에 의해 위상이 $+90^\circ$ 를 향하게 된다.^[2]

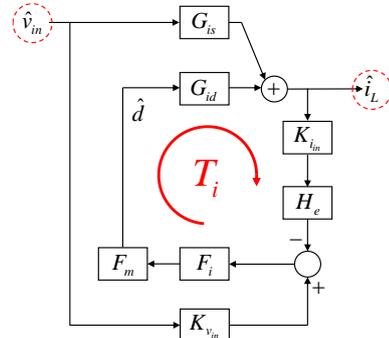


그림 4. PFC 컨버터 제어 블록도

$$T_i(s) = G_{id}(s) \cdot K_{in} \cdot H_e(s) \cdot F_i(s) \cdot F_m \quad (2)$$

$$G_{ci}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{v}_{con}} = \frac{F_m \cdot F_i(s) \cdot G_{id}(s)}{1 + T_i(s)} \quad (3)$$

$$Z_{iU}(s) = \frac{\hat{v}_m}{\hat{i}_L} = \frac{1 + T_i(s)}{K_{vin} \cdot F_i(s) \cdot F_m \cdot G_{id}(s) + G_{is}(s)} \quad (4)$$

$$Y_{iU}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{v}_m} = K_{vin} \cdot G_{ci}(s) + \frac{G_{is}(s)}{1 + T_i(s)} \quad (5)$$

$$Z_{iU}(s) \approx \begin{cases} \frac{1}{K_{vin} \cdot G_{ci}(s)} & T_i(s) > 1 \\ \frac{1}{K_{vin} \cdot G_{ci}(s) + G_{is}(s)} & T_i(s) < 1 \end{cases} \quad (6)$$

4. 외부 임피던스를 고려한 안정도 분석

4.1 마이너 루프 이득 안정도 판별

외부 임피던스의 인덕턴스 L_{Ext} 을 변경하며 마이너 루프 이득이 안정, 불안정한 상황을 상정한다. 이 때, 외부 임피던스 저항은 R_{Ext} 은 $100\text{m}\Omega$ 으로 고정한다.

L_{Ext} 에 따른 각 상황 별 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 을 그림 5에 나타내었다. 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 의 안정도 판별 결과를 표 4에 작성하였다.

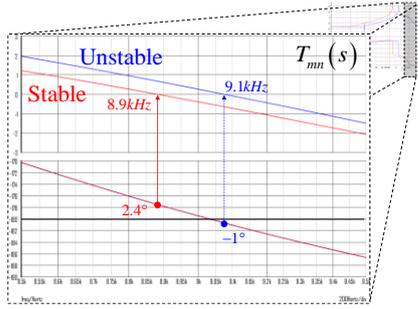
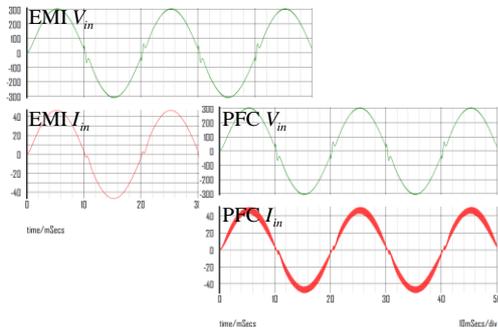


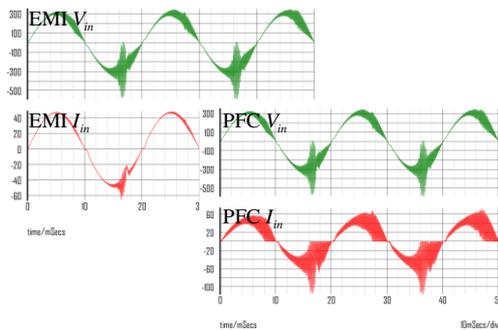
그림 5. L_{Ext} 에 따른 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$

표 4. L_{Ext} 에 따른 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 안정도 판별

구분	안정	불안정	단위
L_{Ext}	2000	500	μH
$\omega_{T_{mm_crossover}}$	$8.9 \cdot 2\pi$	$9.1 \cdot 2\pi$	krad/s
위상 여유	2.4	-1	$^\circ$



(a) $L_{Ext} = 2\text{mH}$



(b) $L_{Ext} = 500\ \mu\text{H}$

그림 6. L_{Ext} 에 따른 시간 영역 시뮬레이션

4.2 시간 영역 시뮬레이션

L_{Ext} 에 따른 시간 영역 시뮬레이션을 통해 안정도 판별 방법을 검증한다. 그림 6에 EMI 필터의 입력과 PFC 입력의 전압, 전류를 도시한다. 그림 6 (b)는 400V 수준의 입력 전압 공진이 관측되었다. 마이너 루프 이득의 안정도 판별 방법이 유효함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 외부 임피던스를 고려한 안정도 분석 방안을 정리하였다. $Z_{of0_{Ext}}(s)$ 와 $Z_{iU}(s)$ 관계를 이용한 마이너 루프 이득 $T_{mm}(s)$ 을 통해 안정도를 판별할 수 있다. 그리고 그 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하여 안정도 분석 방안이 유효함을 확인하였다. 일반적으로 두 임피던스가 교차하는 지점에서의 위상 차이 ($\angle Z_{of0_{Ext}}(s) - \angle Z_{iU}(s)$) 가 -180° 이상일 때 불안정하다.

정전력 제어를 하는 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스는 저주파 대역에서 위상이 -180° 인 부저항 성질을 띈다.^[4] 그러므로 저주파 대역에서 필터의 출력 임피던스와 교차했을 때, 위상 차이가 -180° 이상이고 저주파 대역에서 시스템이 불안정할 확률이 높다.

입력전압과 동상 전류 제어를 하는 PFC의 입력 임피던스는 저주파에서 위상이 0° 인 정저항 성질을 띈다.^[2] 그러므로 저주파 대역에서 시스템이 불안정할 확률이 적다. 그러나 전류제어의 교차주파수 이후인 수 kHz의 고주파 대역에서 PFC의 입력 임피던스는 위상이 $+90^\circ$ 인덕턴스 성분, EMI 필터의 출력 임피던스는 위상이 -90° 커패시턴스 성분을 보인다. 따라서 교차 지점에서 위상 차이가 -180° 이상이고 고주파 대역에서 시스템이 불안정할 확률이 높다.

향후 마이너 루프 이득 안정도 판별 방법을 이용하여 PFC 하드웨어의 안정도를 판별하고 결과를 실측할 예정이다.

참고 문헌

- [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] J. Sun, "Input Impedance Analysis of Single-Phase PFC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 308-314, Mar-2005.
- [3] J. W. Shin, and B. H. Cho, "Digitally Implemented Average Current-Mode Control in Discontinuous Conduction Mode PFC Rectifier," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 7, pp. 3363-3373, Jul. 2012.
- [4] S. K. Pidaparthi and B. Choi, "Input Impedances of PWM DC-DC Converters: Unified Analysis and Application Example," Journal of Power Electronics, vol. 16, no. 6. The Korean Institute of Power Electronics, pp. 2045-2056, 20-Nov-2016.
- [5] Byungcho Choi, Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, Control, and DC Power Distribution Systems, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2021.