

# 계통 연계형 인버터와의 연계를 위한 Dual Active Bridge 컨버터의 입력단 임피던스 분석과 부궤환 제어기 설계 방향

이원빈, 최현준, 정지훈  
울산과학기술원(UNIST)

## Input Impedance Analysis and Feedback Controller Design of Dual Active Bridge Converter Connected to Line-interactive Inverter

Won-Bin Lee, Hyun-Jun Choi, Jee-Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

### ABSTRACT

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기를 구성하는 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터와 계통 연계형 인버터와의 연결에 따른 임피던스 영향을 분석하기 위해 컨버터의 입력 임피던스와 인버터의 출력 임피던스 각각에 대한 전달함수를 분석하고자 한다. 이를 통해 인버터와 컨버터 간의 임피던스 영향을 이론 분석과 모의 시험을 통해 확인하고, 제어기의 설계 방향을 제안하고자 한다.

### 1. 서론

최근 화석 연료의 저감과 전력전송 효율 증가의 이유로 DC Microgrid (MG)에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. DC MG의 핵심요소인 지능형 반도체 변압기는 양방향 AC-DC 정류기, 인버터, 양방향 DC-DC 컨버터로 구성된다. 그림 1은 AC-DC 인버터와 DC-DC 컨버터의 연결을 보여준다. AC-DC 인버터와 DC-DC 컨버터의 연결은 일반적으로 많이 사용되는 결합방법이다. 컨버터의 앞 단에 AC-DC 인버터나 입력 단 필터 등이 연결되었을 경우 설계된 DC-DC 컨버터 제어기의 성능을 저하시키거나 동작이 불안정해질 수 있으므로 컨버터의 안정적인 동작과 성능을 위해 임피던스 영향 분석이 필요하다<sup>[1]</sup>. 양방향 AC-DC 인버터는 스위치의 개수가 적은 단상 인버터를 사용했으며, 양방향 DC-DC 컨버터는 제어가 용이한 DAB 컨버터를 이용하였다.

임피던스 간 영향은 Middlebrook's Extra Element Theorem (EET)을 이용하여 컨버터의 입력 임피던스와 인버터의 출력 임피던스의 상호 간의 영향에 대한 이론 분석과 모의시험을 통해 제어기의 설계 방향을 제안하고자 한다.

### 2. 입력 및 출력 임피던스 분석

DC-DC 컨버터와 AC-DC 인버터 간의 임피던스 영향에 대한 분석을 하기 위해 인버터의 출력 임피던스와 컨버터의 입력 임피던스 각각에 대한 분석이 필요하다. 2절에서는 제어기가 포함된 인버터의 출력 임피던스와 컨버터의 입력 임피던스를 분석하였고, 임피던스 간 영향을 Middlebrook's Extra Element Theorem (EET)를 이용하여 보드선도를 통해 꺾치는 영역이 있음을 확인하였다.

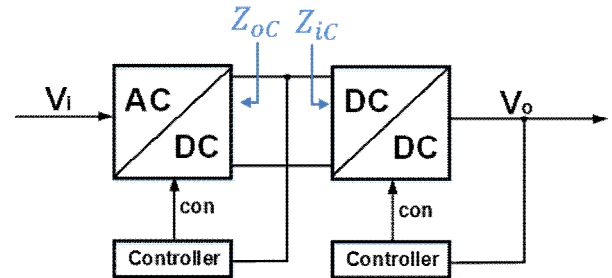


그림 1. AC-DC 인버터와 DC-DC 컨버터의 연결  
Fig.1. Connection of AC-DC inverter and DC-DC converter

### 2.1 AC-DC 인버터의 출력 임피던스 분석

AC-DC 인버터는 출력 임피던스에 대한 전달함수를, DAB 컨버터는 입력 임피던스에 대한 전달함수를 구하고자 한다. 인버터 출력 임피던스는 출력전류 대 출력전압의 전달함수로 부궤환 제어기가 포함된다. 출력 임피던스 전달함수는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z_{oc} = \frac{v_o}{i_o} = k_o \frac{s(\frac{s}{\omega_z} + 1)}{\frac{s^2}{\omega_p^2} + \frac{s}{Q\omega_p} + 1} \quad (1)$$

$k_o$  는 전달함수의 이득,  $\omega_p$  는 double pole,  $\omega_z$  는 single zero를 각각 나타낸다. 출력 임피던스 전달함수는 저주파 영역에서 zero의 영향으로 20 dB/dec의 기울기를 가지다가 double pole과 고주파 영역의 zero의 영향으로 최종적으로 0 dB/dec의 기울기를 가지게 된다.

### 2.2 DAB 컨버터의 입력 임피던스 분석

DAB 컨버터 입력 임피던스는 입력전류 대 입력전압의 전달함수로 부궤환 제어기가 포함된다. 입력 임피던스의 전달함수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Z_{ic} = \frac{v_i}{i_i} = k_{ic} \frac{1}{(\frac{s}{\omega_p} + 1)} \quad (2)$$

$k_{ic}$  는 전달함수의 이득,  $\omega_p$  는 single pole을 각각 나타낸다. 입력 임피던스 전달함수는 저주파영역에서 컨버터의 부저항 특성으로 인해 일정한 이득 값이 유지되다가 저주파 영역의 single pole의 영향으로 -20 dB/dec의 기울기를 가지고 감소하게 된다.

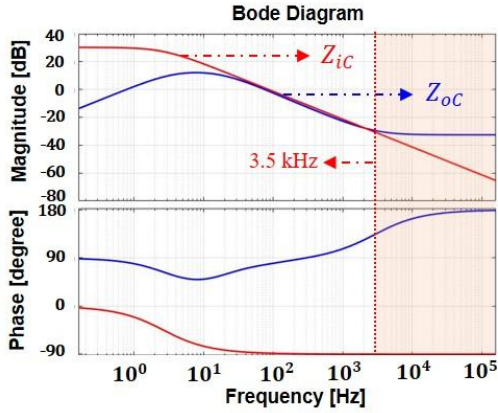


그림 2. AC-DC 인버터와 DC-DC 컨버터의 임피던스 보드선도  
Fig. 2 Bode plot of Impedance between AC-DC inverter and DAB converter

### 2.3 임피던스 영향 분석

AC-DC 인버터의 출력 임피던스가 DAB 컨버터 제어기의 미치는 임피던스 영향은 Middlebrook's Extra Element Theorem (EET)을 이용하여 분석하였다<sup>[2]</sup>. DAB 컨버터의 제어변수 대 출력전압의 전달함수에 Extra Element로 AC-DC 인버터의 출력 임피던스를 고려한다. AC-DC 인버터의 출력 임피던스에 의한 DAB 컨버터의 새로운 전달함수는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$G_{vd\_new} = G_{vd} \left( 1 + \frac{Z_{oc}}{Z_{ic}} \right) \quad (3)$$

$G_{vd\_new}$  는 임피던스 영향에 의한 DAB 컨버터의 새로운 전달함수,  $G_{vd}$  는 DAB 컨버터의 임피던스 영향이 없는 제어변수 대 출력전압의 전달함수를 나타낸다.

DAB 컨버터의 전달함수에 임피던스의 영향이 없기 위해서는 식 (4)를 만족해야 한다.

$$|Z_{oc}| \ll |Z_{ic}| \quad (4)$$

즉 AC-DC 인버터의 출력 임피던스가 DAB 컨버터의 입력 임피던스보다 작을 경우 식 (4)를 만족하게 된다. 식 (4)를 만족한다는 것은 임피던스 영향이 0이 되어 DAB 컨버터의 제어변수 대 출력전압의 전달함수가 변하지 않음을 의미한다. 이와 반대로 인버터의 출력 임피던스가 컨버터의 입력 임피던스보다 큰 주파수 영역에서는 DAB 컨버터의 제어변수 대 출력전압이 식 (3)과 같이 변하게 되어 기존에 설계된 컨버터의 제어기 성능이 저하되거나 안정적인 동작 특성에 악영향을 미치게 된다.

그림 2는 2절에서 분석한 AC-DC 인버터의 출력 임피던스 (파란색)와 DAB 컨버터의 입력 임피던스 (빨간색)에 표 1과 2의 설계 매개변수를 적용한 보드선도를 나타낸다. 컨버터의 동작에 영향을 미칠 수 있는 임피던스 간에 겹치는 영역 (붉은색 영역)이 3.5 kHz 이후에 존재한다. 그림 3은 모의시험 (PSIM) 소프트웨어를 이용하여 DAB 컨버터 단독으로 제어기를 설계한 컨버터와 AC-DC 인버터가 연결된 컨버터의 계단 부하응답 (Step Load Response) 모의시험 파형이다. 빨간색은 컨버터 단독으로 설계된 제어기를 이용한 스텝 응답파형을 나타내며, 파란색은 AC/DC 인버터가 연계된 컨버터의 스텝응답파형을 나타낸다.

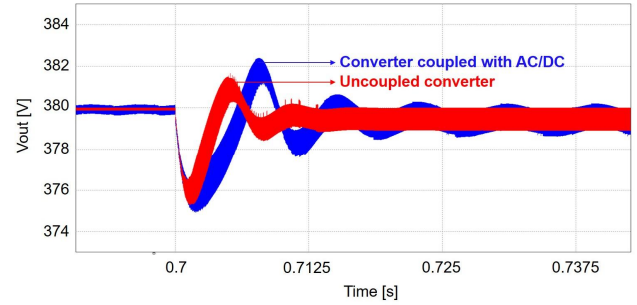


그림 3 DAB 컨버터 제어기의 임피던스 영향 시뮬레이션 (PSIM)  
Fig. 3 Simulation result of DAB converter for impedance influence in time-domain

표 1 DAB 컨버터에 적용된 설계 매개변수

Table 1 Design Parameters of DAB Converter

$V_i, V_o$	380 V	$L_s$	90 $\mu$ H
$C_i, C_o$	1.36 mF	$f_s$	50 kHz
RL	43.76 $\Omega$	$R_{Ls}$	0.01 $\Omega$
$N2/N1$	1	$P_o$	3.3 kW

표 2 AC-DC 인버터에 적용된 설계 매개변수

Table 2 Design Parameters of AC-DC PWM Inverter

Grid Voltage	220 Vrms	DC Link Voltage	380 V
DC Link Cap.	2.272 mF	Filter inductance	1.6 mH
ESR	23.48 m $\Omega$	ESL	391.2 m $\Omega$

앞서 이론분석을 통해 예상했던 바와 같이 컨버터의 제어기의 동 특성이 저하되었고, 출력전압이 리플을 가지고 있음을 확인하였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기의 구성요소 중 AC-DC 인버터와 DAB 컨버터가 연결되어 임피던스의 영향을 이론적으로 분석하여 영향이 나타남을 확인하였다. 임피던스의 영향은 컨버터 단독으로 설계된 제어기의 성능을 저하시키거나 안정적인 동작에 영향을 미칠 수도 있다. 임피던스 영향을 모의시험 (PSIM) 소프트웨어를 이용한 스텝응답시험을 통해 제어기의 성능이 저하됨을 확인하였다. 이를 통해 동 특성 향상 및 안정적인 동작을 위한 제어기 설계를 위한 연구를 계속 진행하고자 한다.

이 논문은 2016년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF2016R1A2B4011934)

## 참고 문헌

- [1] B. Choi, "Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, and Control Designs," Wiley-IEEE Press, 2013.
- [2] R. D. Middlebrook, "Null double injection and the extra element theorem," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 32, no. 3, pp. 167-180, Aug 1989.