

## 부하변동에 따른 고정주파수 LCL형 DC-DC 컨버터 해석 및 실험

박상은\*, 차한주\*\*  
국방과학연구소\*, 충남대\*\*

### Analysis and Testing of A fixed frequency LCL-type DC-DC Converter under load variations

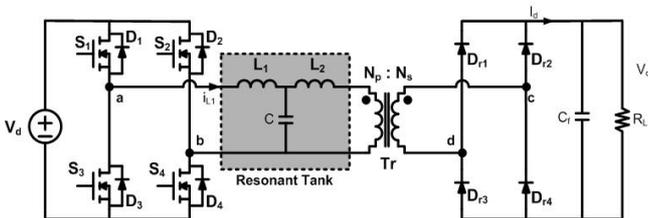
Sangeun Park\*, Hanju Cha\*\*  
ADD\*, Chungnam National University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 고정주파수에서 제어되고, LCL 공진성분을 가지는 풀-브리지 형태의 dc-dc 컨버터에 대해서 논의하였다. 제안된 컨버터는 부하에 관계없이 컨버터 이득이 동일한 출력값을 가지는 주파수를 가지는 지점에서 동작하게 된다. 특히, 컨버터에서 부하변동에 대한 특성은 부하에 따른 컨버터의 스위치 전류에 대한 특성을 확인하기 위해서 공진탱크에 대한 입력 임피던스와 출력 임피던스를 크기와 위상을 부하변동에 따른 주파수 특성을 분석하였다. 이와 같이 제안된 컨버터에 대한 특성을 확인하기 위해서 요구사항에 적절한 성분을 선정하여 컨버터를 설계 및 제작하였다. 실험결과는 부하변동에 따른 컨버터의 특성을 검증하기 위해서 수행되었다.

### 1. 서 론

최근에 신재생에너지, UPS, 에너지 저장시스템 및 전기자동차의 배터리 충·방전시스템 등 다양한 분야에서 공진형 컨버터가 적용되고 있다. 특히, 그림 1에서 보여지는 것처럼 듀얼 액티브 DC-DC 컨버터는 자동차 응용분야 및 재생에너지 시스템 분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 컨버터는 초기에 소형, 경량을 요구하는 항공, 우주분야의 전원공급 장치와 인버터 적용으로 시작하였으며, 최근에는 모든 산업분야에서 공진형 컨버터가 사용되고 있다. 기술의 발전과 더불어 컨버터에 적용되는 스위치들이 고속화, 대용량화가 요구되고, 동시에 컨버터의 고효율, 고밀도를 필요로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 고주파수 스위칭을 수행하는 단계에서 사용되는 모든 파워 스위치는 전자기적 간섭(Electro-magnetic Interference, EMI)저감 및 스위칭 순간 스위치의 전압이나 전류가 제로가 되게 함으로써 스위칭 손실을 최소화하는 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching, ZVS)과 영전류 스위칭(Zero Current Switching, ZCS)이 가능한 공진형 컨버터가 요구된다. 공진형 컨버터에서 파워 스위치는 스위치에 공진을 일으키는 공진성분인 인덕터와 캐패시터를 추가하여 구성되며, 이를 위해서 여러 형태의 토폴로지는 물론 다 다양한 구성의 형태가 연구되어지고 있다.

본 논문에서는 그림1과 같이 풀-브리지 LCL형태의 절연형 DC-DC 컨버터를 논의하였다. 공진 네트워크의 입력과 출력임피던스 분석을 통해 제안된 컨버터의 특성을 검증하는데 초점을 두었다. 이 컨버터는 특정한 주파수를 선택하여 동작하며, 입력전압에 대해 모든 부하 영역에서 일정한 출력전압을 갖도록 동작시켰다. 또한 추가회로 없이 고정주파수 형태로 동작하므로 제어가 단순한 방식이다. 이렇게 설계/제작된 컨버터 특성은 다음과 같다. 첫째, 배치된 공진성분에 따라 입력 전압에 대해 부하변동에 상관없이 일정한 출력 전압을 출력하는 전압형 전원공급 장치로 동작한다. 둘째, 해당 주파수에서 동작하는 경우, 인버터 출력전압( $V_{ab}$ )에 비해서 스위치 전류( $i_{L1}$ )는 부하 변동에 관계없이 입력 임피던스가 유도성부하 특성을 가지게 되므로 지상모드(lagging mode)로 동작하고, 영전압에서 스위치를 켜는 특징을 갖는다. 셋째, LCL형 공진성분은 변압기가 없을 경우에도, 요구되는 주파수로 스위칭을 수행하게 되면, 적용된 인덕턴스의 비( $L_2/L_1$ )에 따라, 선형적으로 스텝 업 또는 스텝다운 출력을 갖는다.

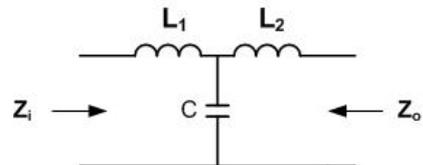


〈그림 1〉 제안된 LCL형 DC-DC 컨버터 회로

### 2. 본 론

#### 2.1 컨버터 해석

그림 2는 제안된 컨버터에서 적용된 LCL형 공진형 네트워크를 보여주며, 입력임피던스( $Z_i$ )와 출력임피던스( $Z_o$ )에 따른 컨버터 해석을 수행하였다. 그 결과 식(1)~식(4)와 같다. 식(1)은 부하가 단락된(shorted) 상태의 입력 임피던스, 식(2)는 부하가 무부하(open) 상태의 입력 임피던스, 식(3)은 입력회로가 단락된 상태의 출력 임피던스, 식(4)는 입력회로가 개방된 상태의 출력 임피던스를 나타낸다.



〈그림 2〉 LCL형 공진 네트워크

$$Z_{io} = \frac{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)}{s^2 L_2 C + 1} \quad (1)$$

$$Z_{i\infty} = \frac{s^2 L_1 C + 1}{sC} \quad (2)$$

$$Z_{o0} = \frac{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)}{s^2 L_1 C + 1} \quad (3)$$

$$Z_{o\infty} = \frac{s^2 L_2 C + 1}{sC} \quad (4)$$

공진 네트워크의 성분들이 이상적이라면, 입력 임피던스,  $Z_i$ 는 부하저항  $R$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 이는 Middlebrook's Extra Element 이론, 즉, 식(5)을 적용하면, 식(6)과 같다[1]. 적용된 입력 임피던스에 대한 부하저항  $R$ 은 변압기, 정류기, 용량성 필터를 포함하고, 출력 임피던스의 경우에는 브리지 스위치를 포함한 부하를 각각 나타낸다.

$$Z_i(s) = Z_{i0}(s) \frac{(1 + \frac{R}{Z_{o0}(s)})}{(1 + \frac{R}{Z_{o\infty}(s)})} = Z_{i\infty}(s) \frac{(1 + \frac{Z_{o0}(s)}{R})}{(1 + \frac{Z_{o\infty}(s)}{R})} \quad (5)$$

$$Z_i(s) = \frac{s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_1 C R + s(L_1 + L_2) + R}{s^2 L_2 C + s C R + 1} \quad (6)$$

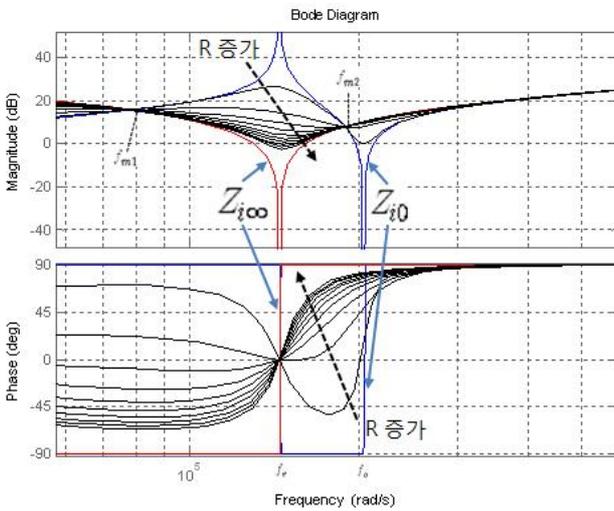
그림 3은 식(1)~(6) 의해서 구해진 임피던스에 대한 분석을 수행한 결과로, 부하변동에 따른 공진 네트워크의 입력 임피던스의 크기와 위상을 각각 보여준다.

부하 변동에 따른 임피던스의 크기는 주파수  $f_{m1}$ ,  $f_{m2}$ 에서 서로 교차하는 지점, 공진주파수  $f_r$ , 및 본 논문을 통해 설계된 운용주파수  $f_o$ 가 존재하게 된다. 임피던스에 따른 주파수 구간별 특성은 다음과 같다. 만약 컨버터의 스위칭 주파수가  $f_s \leq f_{m1}$  선택되면, 입력 임피던스는  $\|Z_{io}\| \geq \|Z_{i0}\|$  이다. 무부하 스위치 전류의 크기는 쇼트된 스위치 전류보다 작다. 이로써 쇼트된 스위치 전류는 인덕터 임피던스에 의해서

제한되고, 반면에 무부하인 경우에 있어서 스위치 전류는 캐패시터에 의해 결정된다.

스위칭 주파수가  $f_{m1} \leq f_s \leq f_r$ 에서 선택되면, 입력 임피던스 크기는  $\|Z_{i\infty}\| \leq \|Z_{i0}\|$ 가 된다. 이로써 무부하 스위치의 전류 크기가 쇼트된 스위치 전류보다 크다. 부하 전류가 작아짐에 따라, 스위치 전류가 커지고, 높은 도통 손실을 발생시킨다. 이 부분에서는 부하가 작을수록 효율이 좋지 않다. 특히, 스위칭 주파수를 공진주파수와 동일하게 선택할 경우,  $f_s = f_r$ 는 스위치의 전압과 전류 위상이 동상이며 컨버터는 모든 부하 영역에서 일정한 전류로 제한되는 특성을 가지게 된다[2].

컨버터의 스위칭 주파수가  $f_r \leq f_s \leq f_{m2}$ 에서 선택되면, 입력 임피던스 크기는  $\|Z_{i\infty}\| \leq \|Z_{i0}\|$ 가 된다. 쇼트된 회로 전류는  $\|Z_{i0}\|$ 에 의해서 결정되고, 반면에 무부하인 경우에 있어서는  $\|Z_{i\infty}\|$ 에 의해서 결정된다. 이 부분에서는 입력 임피던스의 위상이 부하 변동에 따라 부호가 바뀌는 경계 부하가 존재함을 알 수 있다.  $f_s \geq f_{m2}$ 일 경우, 임피던스 크기는  $\|Z_{i\infty}\| \geq \|Z_{i0}\|$ 이다. 이 부분에서는 부하에 상관없이 일정한 출력 이득을 가지게 되는 특수한 주파수  $f_o$ 가 존재하고, 입력 임피던스의 위상 특성이 모든 부하 영역에서 전압이 전류보다 앞서서 유도성 부하 특성을 가지게 됨을 직관적으로 확인할 수 있다[3]



<그림 3> 부하변동에 따른 공진 네트워크 임피던스의 크기 및 위상

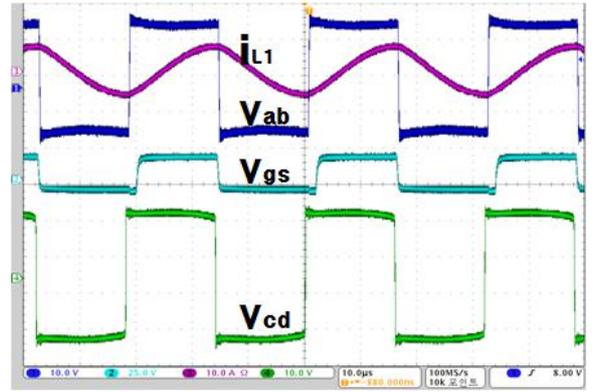
## 2.2 실험결과 및 분석

<표 1>은 제안된 컨버터의 특성 등을 입증하기 위해서 설계에 적용된 파라미터 값을 보여준다. 공진성분인 인덕터( $L_1, L_2$ ) 값은 동일하게 제작하고, 적용된 고주파수 변압기 역시 변압기의 영향과 입출력 전압의 특성을 확인하기 위해서 턴수비,  $N_s/N_p$ 를 1로 제작하였다. 언급된 공진 성분에 대한 값은 계측기에 의해서 실측된 값이고, 운용 주파수 역시 주변 성분의 오차를 고려하여 약간의 수정된 값을 찾아서 실험을 수행하였다.

<표 1> 제안된 컨버터의 실험 파라미터

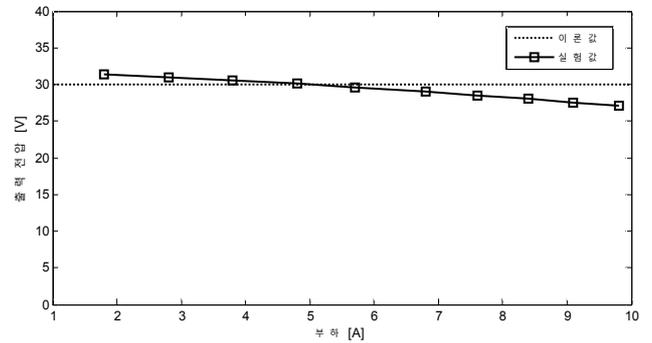
파라미터	값
입력전압 (Vdc)	30
출력전압 (Vdc)	30
공진주파수 (kHz)	22.65
운용주파수 (kHz)	32.03
$L_1$ ( $\mu H$ )	32.92
$L_2$ ( $\mu H$ )	32.87
$C$ ( $\mu F$ )	1.5
$N_s/N_p$	1.0

그림 4는 설계, 제작된 컨버터에서 스위칭 주파수는  $f_o$ 로 제어하는 경우에 수행된 실험결과로 컨버터의 노드별 전압, 전류 파형을 보여준다. 입력전압  $V_{ab}$ 과 출력전압  $V_{cd}$ 의 크기가 거의 동일하고, 스위치 전류로 인덕터  $L_1$ 에 흐르는 전류는 입력전압에 비해 지상 모드의 특성을 보이며, 그에 따라 컨버터의 스위치는 영전압에서 온하는 특성을 알 수 있다.



<그림 4> 컨버터의 노드별 실험결과 파형

그림 5는 스위칭 주파수가  $f_o$ 로 컨버터를 제어하고, 다양한 부하 변동에 따른 출력전압의 특성을 알아보기 위한 실험결과이다. 입력전압에 대한 출력전압이 작은 부하에서는 실험용으로 제작된 인덕턴스 오차에 따른 인덕턴스 비가 1보다 다소 커서 출력전압이 이론값보다 크게 나타나고, 부하가 커짐에 따라 정류기, 컨버터를 구성하는 주변 소자 성분들의 도통저항성분으로 인한 영향이 인덕턴스비보다 영향을 많이 받아 이론값에 비해 감소하는 경향을 보이게 됨을 확인할 수 있다.



<그림 5> 부하 변동에 따른 출력전압

## 3. 결 론

본 논문에서는 풀-브리지 형태의 LCL 형 절연형 컨버터에 대한 분석 및 실험을 수행하였다. 분석 수행을 위해서 공진성분으로 구성된 LCL형 공진탱크에서 입력 임피던스와 출력 임피던스 값을 통해서 부하 변동에 따른 컨버터의 특성을 주파수 범위에 따라 특성을 확인하였다. 또한, 제작된 컨버터는 고정득(50%)와 고정주파수  $f_o$ 에서 제어하였고, 공진성분인 두 개의 인덕터의 인덕턴스 비를 동일하게 하여 입력 대 출력비가 동일하다는 것을 입증하였다. 특히, 제안된 컨버터에서 부하 변동에 상관없이 일정한 출력전압을 가지는 특성을 확인하는 실험을 수행하였으며, 소자의 이상적인 가정하여 수행된 예측 값과 실질적인 실험 결과 값에 영향을 미치는 주변 파라미터에 대해서도 확인할 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Robert W.Erickson and Dragan Maksimovic, "Fundamental of Power Electronics", University of Colorado, 2nd Edition, 2000.
- [2] Mangesh Borage, Sunil Tiwari, and Swarna kotaiah, "Analysis and Design of an LCL-T Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol.52, No.6, pp1547-1554, 2005.
- [3] S. Park and H. Cha, "Characteristics and Implementation of LCL type DC-DC Converter for Constant Voltage Power Supply", The Transactions of the KIEE, Vol.64, No.2, pp260-267, 2015.