

# 직렬 및 병렬 입력 구조에 따른 직렬공진형 컨버터의 전력 불평형에 관한 연구

전유중, 권민호, 이종필  
한국전기연구원 전력변환시스템연구센터

## Study on Power Imbalance of a Series Resonant Converter according to Series and Parallel Input Structures

Yujong Jeon, Minho Kwon, Jong-Pil Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

### ABSTRACT

본 논문에서는 특고압 직류배전을 위한 입력-직렬, 출력-병렬 구조를 갖는 다중 모듈 컨버터를 염두에 두고 모듈 간 전력 불평형에 대한 연구결과를 제시한다. 의도적인 편차를 갖는 두 개의 시료를 이용하여 입력 직렬 또는 병렬 구성에 따라 나타나는 실험 결과를 통해 본 연구의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

최근 그린뉴딜 정책과 탄소 중립을 위한 노력들로 인해 신재생 에너지의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 신재생에너지를 안정적이고 유연하게 공급하기 위해 직류 송배전 시스템이 필요하다. 직류 송배전 시스템에 적용되는 전력변환기는 고주파 절연과 고효율 등의 요구사항을 만족해야 한다. 높은 정격을 만족하기 위해 정격이 큰 반도체와 큰 사이즈의 변압기를 적용해야 하는데 단일로는 구성이 어려워 모듈화가 필요하다. 모듈화로 인해 낮은 정격의 반도체를 적용 가능한 이점이 있다.<sup>[1]</sup> MVDC 시스템에서 고효율의 절연형 컨버터 개발이 핵심 기술이며 여러 가지 토폴로지 중 LLC, DAB, SRC 등의 공진형 컨버터들이 있다. 공진형 컨버터의 경우 주파수제어 방법과 고정주파수로 동작하는 방법이 있는데 주파수제어 방법은 공진 주파수의 변동에 따라 변압기가 포화되거나 스위칭 손실이 증가하는 단점이 있다. 고정주파수로 동작 시 앞서 언급한 단점들을 극복하고 소자들의 최적설계가 가능하다. 또한 공진 인덕턴스(Lr)를 작게 설계하면 공진소자 편차에 의해 발생하는 영향을 작게 할 수 있다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 고정주파수로 동작하는 직렬공진형 컨버터에 대해 제안하고 이를 모듈화 하여 결선할 때 공진소자 편차에 따라 발생하는 모듈 간 불평형에 대해 다룬다.

### 2. 직렬공진형 컨버터

#### 2.1 직렬공진형 컨버터 특징

본 논문에서 선정한 토폴로지는 그림 1과 같이 1차 측에 풀브릿지, 공진 인덕턴스(Lr), 그리고 공진 캐패시터(Cr)로 구성되며 2차 측에는 다이오드 브릿지 대신 동기정류 스위치를 사용한다. 반대 방향으로 전류가 흐를 때는 1차 측 브릿지가 동기정류 스위치가 된다.

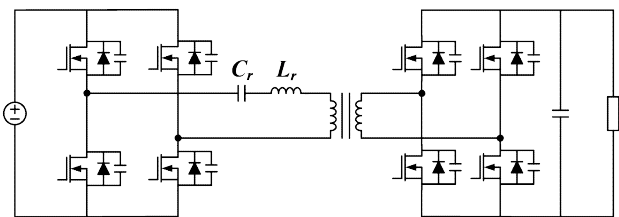


그림 1 풀브릿지 직렬공진형 컨버터 회로  
Fig. 1 Full-bridge series resonant converter circuit

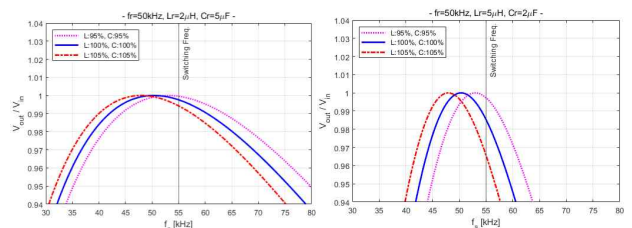
전압전달비 및 공진주파수는 다음과 같이 결정된다.

$$G = n \times \frac{1}{1 + j \frac{\pi^2}{8} \times Q \times \left( \frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s} \right)} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{n^2 \omega_r L_r}{R_L} \quad (3)$$

그림 2는 같은 공진주파수를 갖는 조건에서 공진소자에 편차에 따른 전압이득 곡선을 보여준다. 그림 2(a)는 공진 인덕턴스(Lr)가 작게 설계됐을 때 전압이득 곡선을 보여주며 여기서 공진소자 편차에 의한 전압이득 영향이 적다는 것을 확인할 수 있고 그림 2(b)는 공진 캐패시터(Cr)가 작게 설계됐을 때 편차 별 전압이득 곡선을 보여주며 이때는 공진소자 편차 간 전압이득의 차이가 크게 나타나는 것을 보여준다.



(a) Lr=2uH, Cr=5uF (b) Lr=5uH, Cr=2uF

그림 2 공진소자 편차에 따른 전압이득 곡선  
Fig. 2 Voltage gain curve according to resonant tolerance

## 2.2 직렬공진형 컨버터의 불평형 분석

### 2.2.1 모듈간 병렬 결선 특징

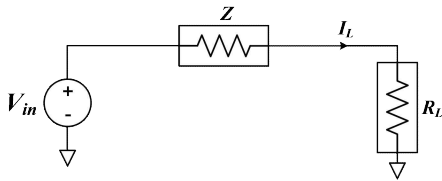


그림 3 특정부하 시 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit at specific load

직렬공진형 컨버터가 고정주파수로 동작할 때 특정부하 상태를 그림 3과 같이 등가회로로 표현할 수 있다. 여기서 컨버터의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z = R_L \times \left( \frac{1}{G} - 1 \right) \quad (4)$$

모듈을 그림 4(a)와 같이 병렬로 결선할 때 이는 그림 4(b)와 같이 등가회로로 표현할 수 있다.

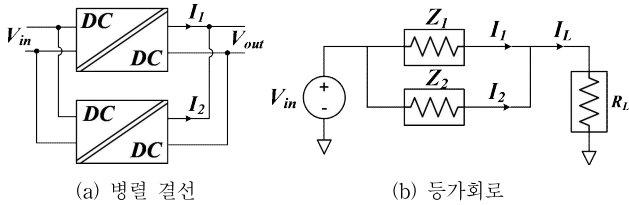


그림 4 병렬 결선 및 등가회로  
Fig. 4 Parallel connection and equivalent circuit

여기서 각 모듈에 흐르는 전류는 전류분배 법칙에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$I_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_L, \quad I_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} I_L \quad (5)$$

식(4), (5)로부터 모듈간 전류차이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta I = I_1 - I_2 = \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2 - 2G_1G_2} I_L \quad (6)$$

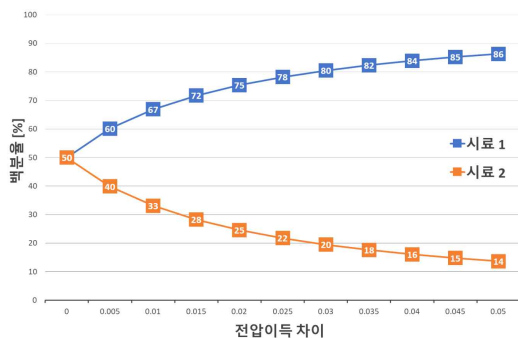


그림 5 병렬 결선 시 출력 전류 분배 그래프  
Fig. 5 Output current distribution graph for parallel connections

그림 5는 식(6)을 이용하여 입력을 병렬로 결선 시 모듈간 전압이득 차이에 따라 발생하는 출력 전류의 차이를 백분율로 보여준다. 전압이득 차이가 증가할수록 모듈간 전류분배 차이는 더욱 커지는 경향을 보이고 이러한 결과로 인해 입력을 병렬로 결선 시에는 액티브한 밸런싱 제어가 필요할 수 있다.

### 2.2.2 모듈간 직렬 결선 특징

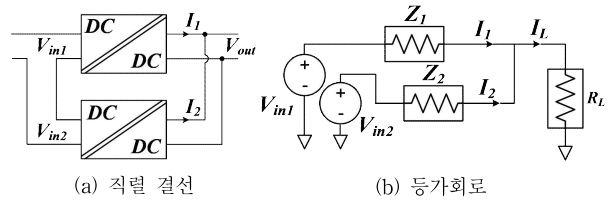


그림 6 직렬 결선 및 등가회로  
Fig. 6 Series connection and equivalent circuit

그림 6(a)과 같이 입력을 직렬로 결선 시 그림 6(b)과 같이 등가회로로 표현할 수 있다. 여기서 출력전압은 공통이기 때문에 공진소자 편차에 의한 임피던스 불평형은 전압이득의 차이에 따라 입력전압의 불평형으로 나타난다. 그림 7은 직렬 결선 시 편차로 인해 발생하는 모듈간 입력 전압차이를 백분율로 나타낸 그래프이며 입력전압 차이는 앞선 병렬 결선의 출력전류 차이보다 크게 나타나지 않는 것으로 확인된다.

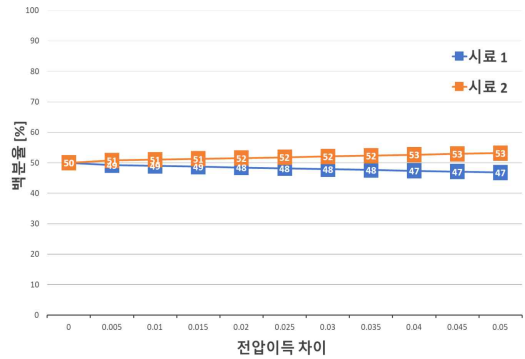


그림 7 직렬 결선 시 입력 전압 분배 그래프  
Fig. 7 Input voltage distribution graph for series connections

그림 8은 전압이득 차이에 의해 발생하는 모듈간 전력 분배의 차이를 결선 방식에 따라 백분율로 보여준다. 병렬로 결선 시 모듈간 전력 분배는 전압이득차이가 커질수록 전류가 한쪽으로 쏠리는 비중이 많아져서 한쪽 모듈의 전력 분담이 커지는 경향을 확인할 수 있으며 반면에 직렬 구성 시에는 입력 전압의 불평형이 다소 차이가 나지만 두 모듈간의 출력 전류 밸런싱으로 인해 출력 전력의 차이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

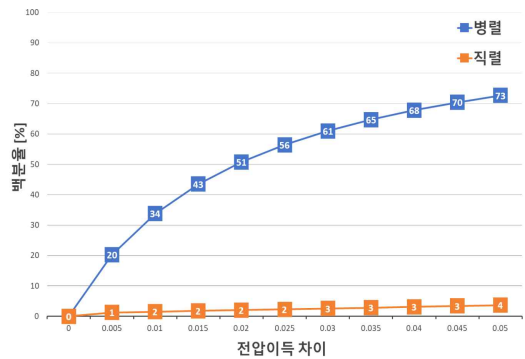


그림 8 결선 방식 별 전력 분배 차이 그래프  
Fig. 8 Power distribution differences graph by connection method

### 2.3 시험 결과

입력에 대한 결선을 직렬과 병렬로 할 때 두 모듈 간의 불평형 차이를 확실하게 보여주기 위해 표 1과 같이 시료 2번의 공진탱크를 1번 시료 대비 2배로 구성하고 스위칭주파수의 경우 1번 시료를 기준으로 47kHz로 선정했다. 그림 9는 각 시료의 전압이득 곡선을 나타낸다.

표 1 직렬공진형 컨버터 공진탱크 파라미터

Table 1 Series resonant converter resonant-tank parameters

	Lr	Cr	fr	fs
1	2.37[uH]	4.44[uF]	49.06[kHz]	47[kHz]
2	2.17[uH]	8.68[uF]	36.26[kHz]	

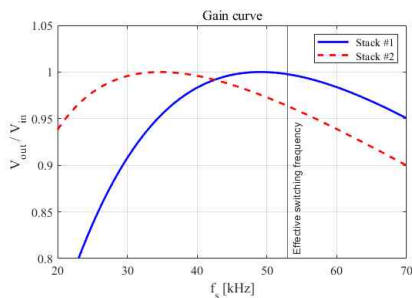
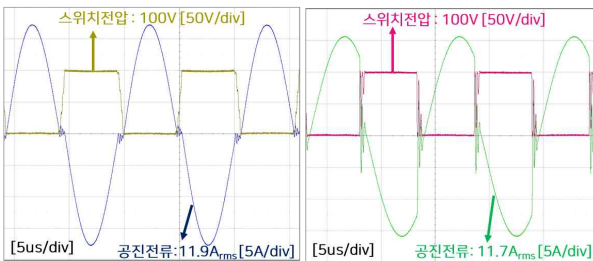


그림 9 시료 별 전압이득 곡선

Fig. 9 Voltage gain curve by sample

단일 모듈 시험을 통해 각각의 시료에 대한 전압이득을 확인했다. 입력전압은 100V이며 10A를 출력한다. 1번 시료의 출력전압은 99.268V로 전압이득은 0.99268이고 2번 시료의 출력전압은 97.547로 전압이득은 0.97547으로 확인됐다. 그림 10(a)은 1번 시료의 스위치 전압과 공진전류 파형이며 그림 10(b)은 2번 시료의 스위치 전압과 공진전류 파형이다.



(a) 1번 시료

(b) 2번 시료

그림 10 단일 모듈 주요 파형

Fig. 10 One module key waveforms

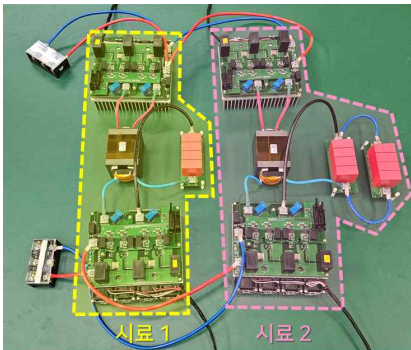
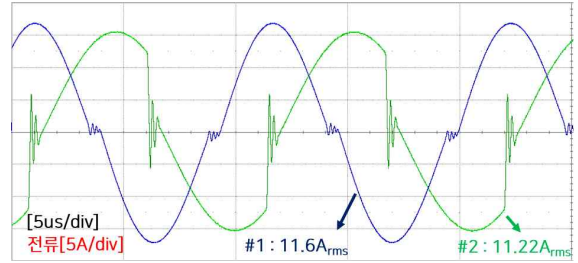
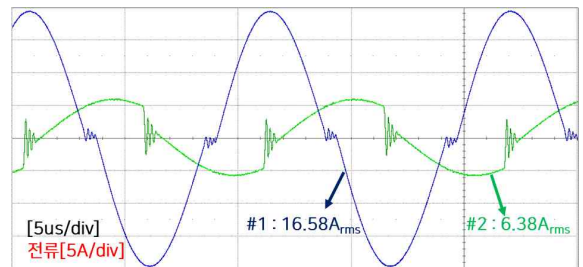


그림 11 직렬공진형 컨버터 시제품 사진

Fig. 11 Series resonant converter prototype photographs



(a) 입력-직렬 결선 공진전류 파형



(b) 입력-병렬 결선 공진전류 파형

그림 12 시제품 실험 파형

Fig. 12 Prototype test waveforms

그림 11은 시제품 사진이며 직렬로 결선되어있다. 앞서 제시한 결선 방법에 따라 모듈 간 발생하는 불평형을 검증하기 위해 시제품을 이용하여 실험하였다. 출력전압은 두 결선 방식 모두 동일하게 100V이며 출력전류는 20A로 한다. 그림 12(a)는 직렬 결선을 했을 때의 각 시료의 공진전류 파형이며 이때 전류는 11.6A<sub>RMS</sub>와 11.22A<sub>RMS</sub>로 크게 벌어지지 않았다. 그림 12(b)의 경우 병렬로 결선했을 때이며 공진전류는 16.58A<sub>RMS</sub>와 6.38A<sub>RMS</sub>로 전류의 쏠림이 발생하는 것을 확인할 수 있었고 본문에서 제시한 비율과 비슷하게 1번 시료는 출력전력 1.4kW, 2번 시료는 출력전력 0.57kW로 확인했다.

### 3. 결론

본 논문은 MVDC에 적용하기 위해 직렬공진형 컨버터를 모듈화하여 입력 결선을 직렬 또는 병렬로 결선했을 때 공진소자 편차에 따라 발생하는 전력 불평형에 대해 연구했다. 입력을 병렬로 결선할 때 특징은 공진소자 편차에 따라 달라지는 전압이득의 영향으로 출력 전류의 쏠림이 발생하여 전력 불평형이 크게 차이 나는 것을 확인하였고 직렬 결선할 때 특징은 입력 전압의 작은 편차 발생과 출력전류 밸런싱을 통해 전력 불평형이 적은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 입력을 직렬로 결선 시 공진소자의 편차는 어느 정도 허용 가능하다는 것을 기대할 수 있다. 시제품을 통해 출력전력 2kW, 출력전압 100V의 조건에서 0.99와 0.97의 전압이득을 갖는 두 모듈 간의 입력 결선 방식 별 시험을 통해 타당성을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] 김석민, 이교범 “DC배전 분야의 전력전자 기술” *대한전기학회 학술지*, 2017. 66권, 11호, pp. 19-23.
- [2] 박준성, 김민재, 최세완, “고정주파수에서 동작하는 SRC를 이용한 차량탑재형 충전기 최적설계” *전력전자학회 2012년도 학술대회 논문집*, 2012. 7, pp. 349-340.