

## 공진 인덕터 보조권선을 이용한 개선된 LCLC 공진형 컨버터

백주원\*, 이영식\*, 정창용\*, 조정구\*, 김흥근\*\*

\* 한국전기연구소 전력전자연구부, \*\* 경북대학교 전자전기공학부

### An improved LCLC Resonant Converter using Auxiliary winding of Resonant Inductor

J. W. Baek\*, S. Y. Lee\*, C. Y. Jeong\*, J. G. Cho\*, H. G. Kim\*\*

\* Power Electronics Div., KERI, \*\* Kyungpook National Univ.

#### Abstract

An improved series-parallel resonant converter using auxiliary winding of resonant inductor is presented. The conventional series-parallel resonant converter and newly developed converter are compared for high voltage application. This proposed converter gives several merits such as a wide load range, small circulating current, low peak voltage at no load. Two experimental results for the proposed converter and conventional one are presented for conventional LCC type converter and the proposed one.

#### I. 서론

고주파방식 고전압 직류전원장치를 구성하는 데에서는 고주파 고압 변압기의 많은 권선으로 인한 누설 인덕턴스와 표유 커패시턴스 성분으로 인해 스위치 양단의 전압 스파이크와 출력 정류 다이오드의 온, 오프 속도의 저하를 가져온다. 특히, 누설 인덕턴스로 인한 듀티 사이클 손실로 인해 출력으로 원하는 전력 전달이 잘 이루어지지 않는 단점이 있다.

이러한 문제를 해소하기 위해 역시 고전압 전원장치에서도 공진형 컨버터를 채택한 방식이 많이 이용되고 있다. 고주파 고전압 전원장치에 적용할 수 있는 공진형 인버터로는 직렬 공진형 인버터와 병렬 공진형 인버터 그리고 직렬-병렬 공진형 인버터가 고려될 수 있다. 직렬 공진형 인버터는 부하전류의 경로에 직렬로 공진회로가 구성되므로 순환전류가 존재하지 않고 부하전류에 비례하는 공진전류가 흐르는 장점을

가진다. 그렇지만 출력전류가 감소하면 고조파의 필터링이 감소되는 단점을 가지며 특히, 무부하에서의 제어가 불가능한 단점을 가진다. 그리고 실제, 고압 변압기는 많은 이차권선에 의한 권선 커패시턴스가 크기 때문에 이상적인 직렬 공진형 컨버터 보다는 직렬-병렬 공진형 컨버터로 볼 수 있다. 그리고 병렬 공진형 컨버터는 무부하에서 전부하에 이르기까지 제어 가능한 장점을 가지며 병렬공진형 커패시터에 의해 컨버터는 전압원으로 동작한다. 그러나 무하변동에 영향을 받지 않는 동작을 얻기 위해서는 병렬 커패시터가 상당히 커져야 하고 이로 인한 순환전류가 상당히 커지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해소하고 각각의 장점을 취합한 형태가 직렬-병렬 공진형 컨버터이다. 낮은 주파수 영역에서는 직렬 공진형 컨버터와 유사한 동작을 하고 주파수가 높아질수록 병렬 공진형 컨버터에 가까운 특성을 나타낸다. 따라서 제어를 위해 주파수 변동폭이 다소 넓으나 직렬 공진 커패시터와 병렬 공진 커패시터를 적절히 선정하므로 우수한 제어특성과 낮은 순환전류 손실이 얻어진다. 그렇지만 직렬-병렬 공진형 컨버터도 병렬 공진형 컨버터에서의 순환전류 문제점을 여전히 내포하고 있으며 완전히 해소하지는 못하였다.

본 논문에서는 기존 병렬 공진형에서의 순환전류 문제를 공진형 인덕터 보조권선을 이용하여 개선시키고 동일 조건의 직렬-병렬 공진형 컨버터에 비해 보다 작은 주파수 변동으로 출력전압 제어가 가능한 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 직렬-병렬 공진형 컨버터와 비교할 때 동일한 제어 주파수 범위를 갖는 회로보다 순환전류가 보다 작은 특성을 나타내며 병렬 공진의 효과가 공진 인덕터의 보조 권선에 의해 나타나는 특성을 나타낸다. 그러므로 비교적 좁은 제어 주파수 가변 범위, 무부하에서 우수한 제어특성

을 보인다. 본 논문에서는 제안하는 회로의 타당성을 검증하고 실험결과를 얻기 위해 최대 12kV, 100W, 80 - 170kHz로 주파수 가변이 가능한 장치를 제작하였다.

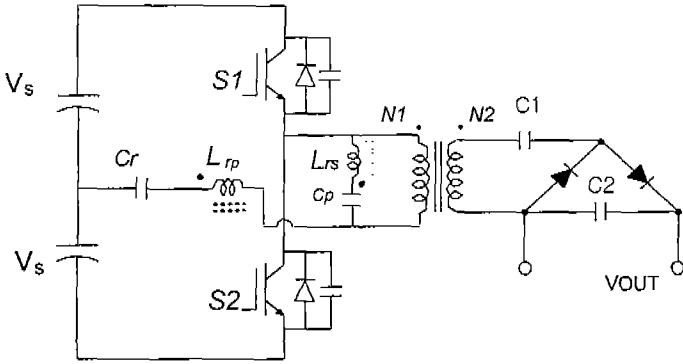


그림 1. 제안하는 LCLC 직 병렬 공진형 컨버터

## II. 회로구성 및 동작원리

그림 1은 제안하는 회로의 개략도를 나타낸다. 기존의 하프 브릿지 직렬-병렬 공진형 컨버터에 단지 공진 인덕터의 이차권선만이 추가되는 간단한 구조이다.

출력전압의 제어는 가변 주파수 제어를 통해 이뤄지며 출력은 고전압을 얻기 위해 2배압 회로를 사용하였다. 다음 그림 2는 등가의 고압 변압기 모델을 나타내었다. 변압기는 누설인덕터가 이상적인 변압기 일차에 존재하고 이차측에 권선 커패시턴스가 병렬로 있는 것으로 볼 수 있다.

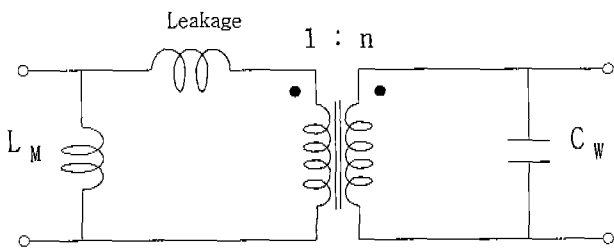


그림 2. 고압 변압기의 등가 모델

그러므로 권선 커패시턴스가 매우 크다고 가정하면 고압 변압기를 장착한 직렬 공진형 컨버터는 직렬-병렬 공진형 컨버터로 해석할 수 있다. 따라서, 외부 병렬 공진 커패시터를 장착한 경우는 변압기의 권선 커패시턴스가 병렬 공진 커패시터와 결합된 형태로 동작하는 것으로 볼 수 있다.

제안하는 회로의 동작의 이해를 돕기 위해 다음 그림 3과 같이 공진회로 부분만을 간략화하여 해석한다. 인덕터의 보조권선은 종속전원으로 나타난다고 보았다. 종속전압은 공진전류에 직접적으로 영향을 받으며

다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_L = nL_r \frac{di_{cs}}{dt}$$

여기서  $n$ 은 권선비,  $i_{cs}$ 는 직렬 공진 커패시터 전류이다. 따라서 종속전원의 전압은 공진 전류에 의해 병렬 공진 커패시터와 직렬로 나타낼 수 있다.

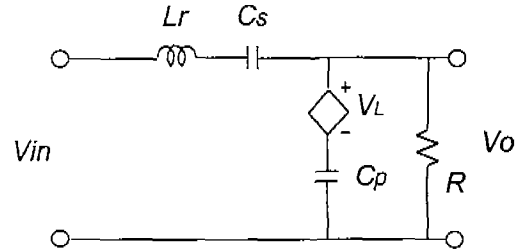


그림 3. 공진회로의 등가회로

제안하는 회로에서 출력전압은 종속전원의 전압만큼 줄어든 전압으로 나타나고 출력 전압 특성 및 공진점은 직렬-병렬 공진회로에서  $C_p$ 의 값이 증가된 것과 같은 동작을 나타낸다. 반면에 순환전류는  $C_p$ 의 값이 줄어든 것에 비례해서 감소하여 병렬 공진회로의 장점만을 이용하는 특징을 갖는다.

다음 식은 입력전압에 대한 출력전압의 비를 종속전압을 고려하여 나타낸 것이다.

$$V_o = \left( \frac{(X_{cs} - X_{Lr})V_L}{X_{cp}} + V_{in} \right) \times A$$

$$\text{여기서, } A = \frac{1}{1 + \frac{X_{cs}}{X_{cp}} - \frac{X_{Lr}}{X_{cp}} + j \left[ \frac{X_{Lr}}{R} - \frac{X_{cs}}{R} \right]}$$

$X_{cs}$ 는 직렬 공진 커패시터의 임피던스,  $X_{Lr}$ 은 공진 인덕터의 임피던스,  $X_{cp}$ 는 병렬 공진 커패시터의 임피던스,  $V_L$ 은 종속전압이다.

식에서 나타낸 것과 같이 공진 인덕터의 임피던스가 직렬 공진 커패시터의 임피던스보다 큰 조건에서 종속전압의 크기가 증가하면 출력전압은 감소함을 알 수 있다. 공진전류도 역시 공진회로의 임피던스에 의해 관계식을 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$I_s = \frac{V_m}{B + C \times V_L + D}$$

$$B = jX_L - jX_{cs}, C = \frac{R}{R - jX_{cp}}, D = \frac{-jX_{cp}R}{R - jX_{cp}} \text{이다.}$$

부하 임피던스와 공진회로의 임피던스가 고정되어 있다고 볼 때, 공진전류는  $V_L$ 에 의해 감소됨을 알 수 있다. 무부하에서의 공진주파수 역시 보조권선의 인덕턴스에 의해 보다 낮아짐을 알 수 있다. 즉, 경부하 또는 무부하에서 공진주파수는 다음식과 같이 나타낼

수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}$$

여기서,  $L_{eq}$  는 공진인덕터 일차권선과 이차권선의 인덕턴스의 합이고,  $C_{eq}$  는 공진 커패시터들의 합으로 나타난다.

### III. 회로의 특징 및 설계

기존의 직렬-병렬 공진형 컨버터는 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 장점을 결합한 형태로 많은 장점을 가지고 있으나 여전히 각 회로의 단점을 내포하고 있다. 즉, 병렬 공진 커패시터  $C_p$ 의 값에 따라 회로의 특성이 많이 달라지며  $C_p$ 의 값이 작아지면 순환전류는 많이 감소하지만 제어를 위해 변동해야 할 주파수의 범위는 보다 넓어지게 된다.

제안하는 회로는 이러한 기존 회로의 단점을 보완하여 공진인덕터의 보조권선을 이용하므로 보다 작은 병렬 공진 커패시턴스 값을 사용하고 이를 통해 순환전류의 값을 줄인다. 반면에 제어 주파수 범위는 보다 작게 하여 우수한 출력 제어특성을 나타낸다.

공진 인덕터와 직렬 공진 커패시터의 값은 사용 주파수대역에서 보다 부하가 작은 경우에 증가하는 스위칭 주파수의 값이 작도록 할 경우, 다음 조건식을 만족하도록 설계한다.

$$X_{Lr} \geq X_{Cs}$$

병렬 공진인덕터의 값은 먼저, 직렬 공진 커패시터의 값과 동일한 값을 기준으로 하여 정한 뒤에, 공진 인덕터 보조권선의 값의 증가치에 반비례하여 줄인다. 보조권선의 권선비는 공진 주파수와 순환전류의 양에 의해 결정한다.

### IV. 실험결과

제안하는 회로의 특성을 파악하고 보조권선에 의한 회로동작을 알기 위해 최대 12kV, 100W, 80 - 170kHz로 주파수 가변이 가능한 장치를 제작하여 실험하였다. 무부하에서의 출력전압이 높게 나타나므로 입력전압은 110VAC로 설정하여 실험하였다. 다음 그림 4는 실험에 사용한 회로를 나타낸 것이다. 제안하는 회로와 기존 직렬-병렬 공진회로의 비교를 위해 두가지 회로를 모두 제작한 뒤, 주파수 대비 출력전압, 공진주파수의 변화와 부하에 따른 공진전류를 살펴 보았다. 그림 5는 직 병렬 공진형 컨버터를 적용하였을 때의 출력전압/ 주파수의 관계를 나타낸 것이다. 공진 인덕터는 300uH, 직렬 공진 커패시터

10nF, 병렬 공진 커패시터는 9.4nF를 적용한 결과이다. 그림 5(a)는 제안하는 회로에서 보조권선이 없을 때의 결과이다. 파형에서 알 수 있듯이 출력전압은 공진점에 가까워질수록 그림 5(c)의 제안하는 회로의 파형보다 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 공진 주파수 역시 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 5(b)는 병렬 공진 커패시터의 값을 1.5배 증가시킨 파형이다. 공진 주파수가 제안하는 회로와 동일함을 알 수 있다. 또한 출력전압의 주파수에 따른 변동은 제안하는 회로와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 제안하는 회로는 병렬 공진 커패시터가 증가한 것과 유사한 제어 특성을 나타냄을 알 수 있다.

그림 6은 부하에 따른 공진전류를 회로별로 나타내어 비교하였다. 3kV의 출력전압, 250kΩ의 부하에서 비교할 때, 제안하는 회로의 공진전류가 병렬 공진 커패시터가 동일한 회로와 비교할 때는 다소 큰 전류가 흐르지만 유사한 공진점과 출력전압 특성을 가지는 병렬 공진 커패시터가 큰 회로에 비해서는 보다 작은 전류가 흐름을 알 수 있다. 결과 파형으로 미루어 볼 때, 제작한 컨버터는 고압 변압기의 권선 커패시턴스와 외부에 추가한 커패시턴스의 영향으로 보다 병렬 공진에 가까운 특성을 나타내었다.

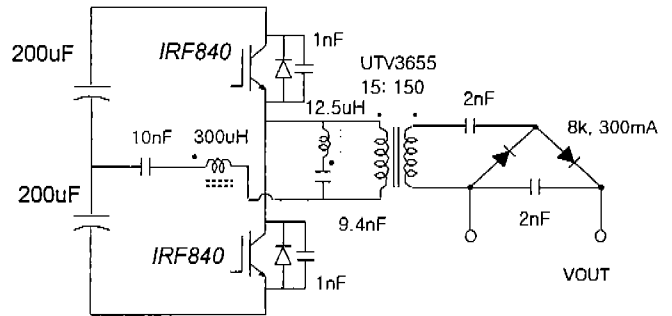


그림 4. 실험에 사용한 회로

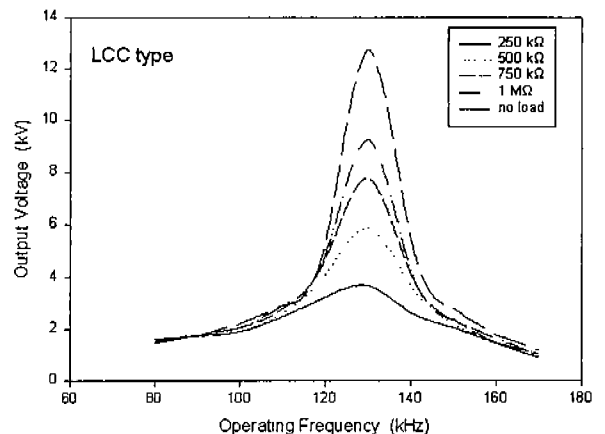


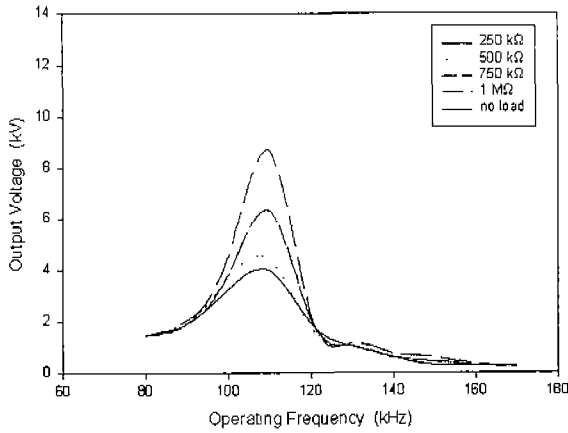
그림 5 (a). 직 병렬 공진형 컨버터의 주파수대비 출력전압 ( $C_p = 9.4nF$ )

## V. 결론

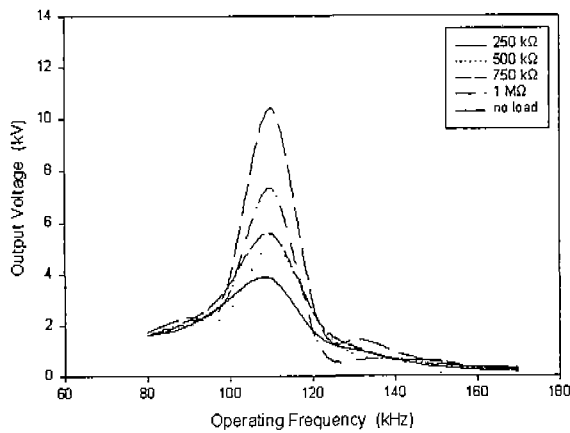
본 논문에서는 기존의 직렬-병렬 공진형 컨버터에서의 단점을 보다 보완하기 위해 공진 인덕터의 보조권선을 이용한 LCLC형 공진형 인버터를 제안하였다. 제안한 회로는 보조권선에 의해 주파수 제어 특성이 보다 개선되는 특징을 나타내었으며 순환전류 역시 다소 줄어드는 양상을 나타내었다. 향후, 제안한 회로의 특성을 보다 잘 규명하기 위해 보조권선에 의한 효과를 보다 체계적으로 정리하는 것이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Marian K. Kazimierczuk, D. Czarkowski, "Resonant Power Converters", John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [2] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Trans. on Power Electronic, Vol. 3, No. 2, pp 174-182, 1988.
- [3] S. D. Johnson, A. F. Witulski, R. W. Erickson, "Comparison of Resonant Topologies in High-Voltage DC Applications", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic systems, Vol. 24, No. 3 pp 263-273, 1988.



(b)



(c)

그림 5. 주파수대비 출력전압

(b) 직, 병렬 공진형 컨버터 ( $C_p = 14.1nF$ )

(c) 제안한 컨버터

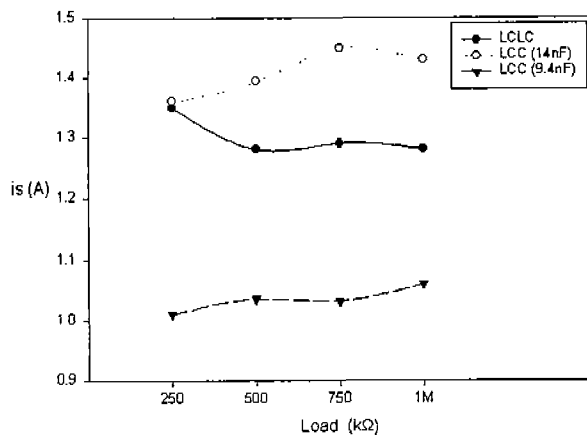


그림 6. 부하에 따른 공진전류의 비교