

연료 전지 시스템을 위한 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터 설계

손성호*, 김태현*, 권창현*, 장성록**, 유찬훈**, 김형석**

*과학기술연합대학원대학교, **한국전기연구원

Design of LCC Resonant Converter with Wide Output Voltage Ranges for Fuel Cell System

Seong-Ho Son*, Chang-Hyun Kwon*, Tae-Hyun Kim*, Sung-Roc Jang**,
Chan-Hun Yu**, Hyoung-Suk Kim**

*University of Science and Technology, **Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

본 논문은 연료 전지 시스템을 위한 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터 설계에 관해 기술한다. 제안하는 설계는 변압기의 턴 비를 공진 탱크의 최대 전압 이득에 따라 조절함으로써 컨버터의 순환 에너지를 최소화한다. 이를 통해 컨버터 설계 시 공진 전류의 실효값과 턴 오프 시 전류값을 최소화할 수 있으며, 설계자는 스위칭 손실과 도전 손실에 대한 고려 없이 전원 장치 사양에 최적화된 공진 탱크를 선정할 수 있다. 제안된 설계를 기반으로 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터에 적절한 공진 탱크 설계 점을 제시한다. 제안하는 설계의 타당성을 30kW LCC 공진형 컨버터의 정격 실험을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근 환경 오염에 대한 관심이 높아짐에 따라 철도, 선박 등 수송 산업 분야에서 화석 연료를 대체하기 위한 친환경적인 에너지원의 필요성이 대두되고 있다. 다양한 신재생 에너지원 중에서 수소 연료 전지는 높은 에너지 변환 효율을 가질 뿐만 아니라, 에너지 변환 시 발생하는 진동 및 소음이 적어 우수한 에너지원으로 주목받고 있다^[1]. 그러나 연료 전지 시스템은 연료 전지의 느린 동특성, 낮은 전압 등의 단점들 때문에 안정적인 동작을 위한 배터리와 연료전지의 낮은 전압을 높은 전압으로 승압하기 위한 DC-DC 컨버터가 필요하다.

공진형 컨버터는 소프트 스위칭 특성 덕분에 높은 효율 및 전력 밀도를 달성할 수 있어 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 공진형 컨버터 토폴로지 중 LLC 공진형 컨버터와 LCC 공진형 컨버터가 우수한 경부하 특성과 변압기 기생 성분 활용이 용이해 주로 사용된다. LLC 공진형 컨버터와 비교해 LCC 공진형 컨버터는 자화 인덕턴스를 공진 탱크로 활용하지 않기 때문에 변압기의 설계가 용이하고 승압과 대용량에 유리하다. 따라서 연료 전지 시스템을 위한 DC-DC 컨버터의 토폴로지로 LCC 공진형 컨버터를 선정한다.

본 논문에서는 연료 전지 시스템을 위한 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터의 설계에 관해 기술한다. 제안하는 설계는 공진 탱크의 전압 이득에 따라 변압기의 턴 비를 선정함으로써, 공진 전류를 최소화해 컨버터의 손실을 줄인다. 또한 넓은 출력 전압 범위에서 출력 전압에 따른 손실

차이를 최소화하는 설계 점을 제시한다. 제안된 설계의 우수성을 30kW LCC 공진형 컨버터의 정격 실험을 통해 검증한다.

2. 제안하는 LCC 공진형 컨버터 설계

그림 1은 일반적인 LCC 공진형 컨버터의 회로도를 보여준다. LCC 공진형 컨버터는 풀브리지 인버터 (S_1-S_4 , D_1-D_4), 공진 탱크 (L_s , C_s , C_p), 변압기 (TR), 그리고 전파 정류기 ($D_{rec1}-D_{rec4}$, C_f)로 구성되며, 부하 저항은 R_o 로 가정한다.

그림 2는 다양한 공진 탱크에 따른 LCC 공진형 컨버터의 전압 이득 그래프를 보여준다. 공진 탱크 변수들은 다음과 같이 정의한다.

$$Q = \frac{R_o}{N_{tr}^2 Z_{op}} = \frac{R_o}{N_{tr}^2} \sqrt{\frac{C_p}{L_s}} \quad (1)$$

$$A = \frac{C_p}{C_s} \quad (2)$$

$$f_N = \frac{f_s}{f_{op}} = 2\pi f_s \sqrt{L_s C_p} \quad (3)$$

$$G = \frac{V_{Cp,peak}}{V_{in}} = \frac{V_o}{N_{tr} V_{in}} \quad (4)$$

여기서 N_{tr} 은 변압기의 턴비, Z_{op} 는 L_s 와 C_p 의 특성 임피던스, f_s 는 스위칭 주파수, 그리고 f_{op} 는 L_s 와 C_p 의 공진 주파수이다. 그림 2에 나타나는 것처럼 LCC 공진형 컨버터는 Q 와 A 가 클 때 높은 전압 이득 (G)을 얻을 수 있다. 기존의 설계들은 변수를 줄이고 해석을 단순화하기 위해 Q 와 A 값을 선정하기 전에 G 와 N_{tr} 을 고정한다^[2]. 그러나 공진 전류의 실효값과 턴 오프 시 전류값은 G 에 크게 영향을 받기 때문에, G 와 N_{tr} 을

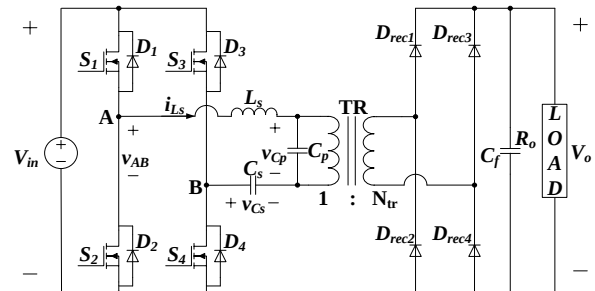


그림1 LCC 공진형 컨버터 회로도

Fig.1 Circuit diagram of LCC resonant converter.

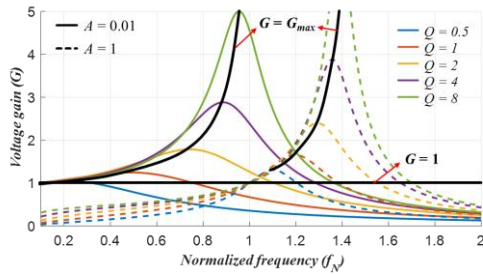
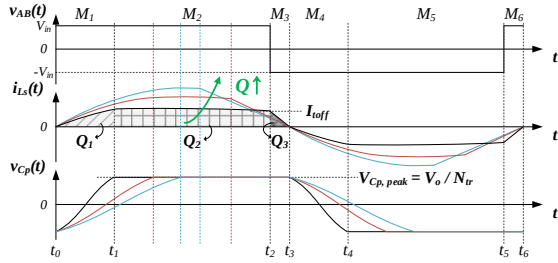
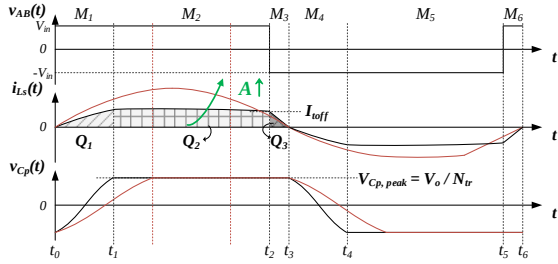


그림 2 Q , f_N , A 에 따른 LCC 공진형 컨버터의 전압 이득 그래프
Fig.2 Gain curve of LCC resonant converter according to Q , f_N , and A .

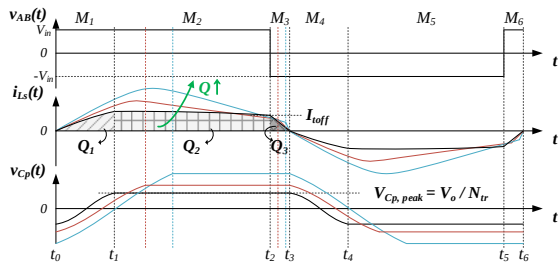


(a)

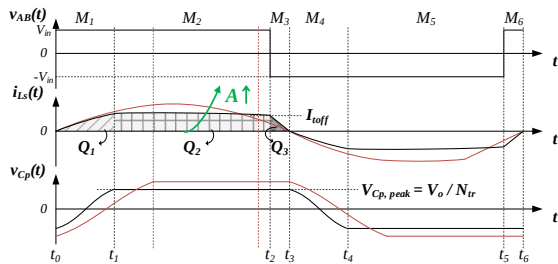


(b)

그림 3 기존 방법으로 설계된 LCC 공진형 컨버터의 Q 와 A 에 따른 동작 파형 (a) Q . (b) A .
Fig.3 Key waveforms of LCC resonant converter with conventional design according to Q and A . (a) Q . (b) A .



(a)



(b)

그림 4 제안된 방법으로 설계된 LCC 공진형 컨버터의 Q 와 A 에 따른 동작 파형 (a) Q . (b) A .
Fig.4 Key waveforms of LCC resonant converter with proposed design according to Q and A . (a) Q . (b) A .

고정하는 설계 방법은 컨버터 설계 사양에 따른 적절한 Q 와 A 의 선정에 제한한다. 제안하는 설계 방법은 Q 와 A 에 따라 달라지는 최대 전압 이득 (G_{max})으로부터 N_{tr} 을 선정한다. 이 방법은 Q 와 A 에 상관없이 공진 전류를 최소화하기 때문에 설계자는 컨버터 설계 사양에 따른 최적의 Q 와 A 를 선정할 수 있다.

2.1 제안하는 설계 방법의 원리

그림 3과 그림 4는 각각 기존 설계와 제안된 설계에서 LCC 공진형 컨버터의 Q 와 A 에 따른 동작 파형을 보여준다. 동일한 출력 전력을 가정할 때, 기존 설계는 Q 나 A 가 증가할 때 $V_{Cp,peak}$ 가 변하지 않기 때문에 공진 전류가 크게 증가해야 한다. 반면에 제안된 설계는 Q 와 A 가 증가할 때 $V_{Cp,peak}$ 가 상승하기 때문에 공진 전류가 크게 변하지 않는다. LCC 공진형 컨버터에서 손실은 $V_{Cp,peak}$ 보다 공진 전류에 크게 영향을 받기 때문에 제안하는 설계는 Q 와 A 에 상관없이 손실을 최소화할 수 있다.

2.2 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터의 설계

표 1은 연료 전지 시스템을 위한 DC-DC 컨버터의 사양을 나타낸다. 일반적으로 넓은 출력 전압을 가지는 컨버터는 모든 출력 전압 조건에서 안정적인 제어를 위해 최대 출력 전압 ($V_{o,max}$)을 기준으로 설계되기 때문에 최소 출력 전압 동작 ($V_{o,min}$) 시 효율이 상당히 떨어진다. 게다가 컨버터의 소자들은 약조건을 기준으로 선정되기 때문에 출력 전압에 따른 효율 차이는 컨버터의 크기와 비용을 증가시킨다. 따라서 출력 전압에 따른 효율 차이를 최소화해야 하며, 공진형 컨버터의 효율은 공진 전류의 실효율에 크게 영향을 받기 때문에 출력 전압에 따른 공진 전류의 실효율 차이를 줄이는 것이 중요하다. 그림 5는 최대 출력 전압과 최소 출력 전압에서 Q 와 A 에 따른 공진 전류의 실효율들을 나타낸다. 그림에서 컨버터는 $V_{o,max}$ 를

표 1 컨버터 사양 및 설계 파라미터

Table 1 Converter specification and design parameters

컨버터 사양		설계 파라미터	
V_{in} (V)	210~290	L_s	14.5uH
V_o (V)	580~810	C_s	9uH
P_o (kW)	30	C_p	1.9uF
$f_{s,min}$ (kHz)	22	N_{tr}	2.2

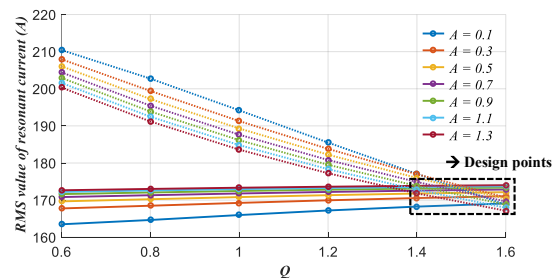


그림 5 $V_{o,max}$ (실선)과 $V_{o,min}$ (점선)에서 Q 와 A 에 따른 공진 전류 실효율
Fig.5 RMS value of resonant current at $V_{o,max}$ (solid curve) and $V_{o,min}$ (dotted curve) according to various Q and A .

기준으로 제안하는 방법에 의해 설계 되기 때문에 공진 탱크에 상관없이 $V_{o,max}$ 에서 공진 전류는 최소화되나, $V_{o,min}$ 에서 공진 전류는 공진 탱크에 따라 크게 달라진다. 본 논문에서는 $V_{o,max}$ 와 $V_{o,min}$ 에서 손실 차이를 최소화하기 위해 Q 는 1.6 그리고 A 는 0.2로 선정한다. 이때 G_{max} 은 1.76이기 때문에 N_r 은 2.2로 구해진다. 선정된 Q , A , 그리고 N_r 로부터 계산된 공진 탱크 (L_s , C_s , C_p)는 표 1에 제시된다.

3. 실험 결과

그림 6은 설계된 30kW LCC 공진형 컨버터 사진을 나타낸다. 높은 전력 밀도를 위해 변압기의 누설 인덕턴스를 직렬 공진 인덕터로 활용한다.

그림 7은 제안된 방법으로 설계된 LCC 공진형 컨버터의 정격 전력 동작에서 정상 상태 파형을 보여준다. 컨버터의 스위칭 주파수와 공진 전류의 실효값은 최소 출력 전압 조건에서 22.2kHz와

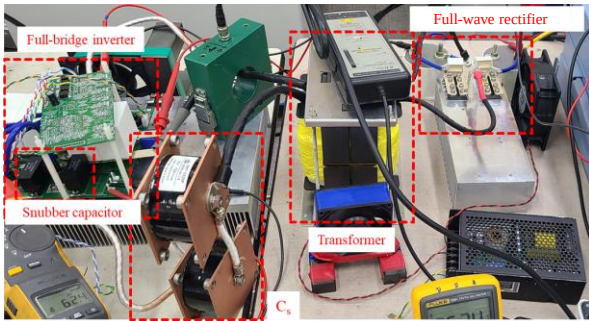


그림 6 연료 전지 시스템을 위해 개발된 30kW LCC 공진형 컨버터 사진

Fig. 6 Photo of developed 30kW LCC resonant converter for fuel cell system.

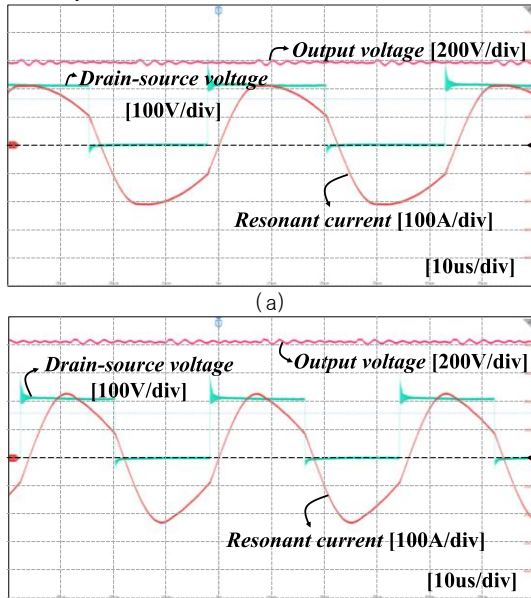


그림 7 30kW 정격 전력 동작에서 제안된 방법으로 설계된 LCC 공진형 컨버터 정상 상태 파형 (a) $V_{o,min}$, (b) $V_{o,max}$.

Fig. 7. Steady-state waveforms of LCC resonant converter with the proposed design in rated power operation (30kW). (a) $V_{o,min}$, (b) $V_{o,max}$.

162.2A로 각각 측정되며, 최대 출력 전압 조건에서 157.8A와 27.8kHz로 각각 측정된다. 제안된 설계는 최대 출력 전압 조건과 최소 출력 전압 조건에서 비슷한 공진 전류 실효값을 보여주며, 580V 출력 전압 조건에서 최대 효율 97.1%를 달성한다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료 전지 시스템을 위한 넓은 출력 전압 범위를 가지는 LCC 공진형 컨버터의 설계에 대하여 기술하였다. 제안된 설계의 우수성은 30kW LCC 공진형 컨버터의 정격 동작 실험을 통해 검증했다. 580V의 출력 전압 조건에서 최대 효율 97.1%를 달성했으며, 출력 전압에 따른 손실의 차이를 최소화했다.

참 고 문 헌

- [1] 김정은, 류상균, 이재범, 박찬배, 정광우. (2021). 넓은 입 · 출력 전압 사양의 수소연료전지-배터리 기반 철도차량용 고밀도 절연 승압형 DC-DC 컨버터에 관한 연구. 한국철도학회 논문집, 24(11), 1016-1030.
- [2] S. -R. Jang, C. -H. Yu and H. -J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of a Multistage Capacitor Charger for a Solid-State Marx Modulator," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3816-3825, May 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2716975.