

Current Doubler 정류회로를 적용한 LLC 공진 컨버터의 수식화 해석

신정윤*, 김학원*, 조관열*, 황순상**, 정동욱**
한국교통대학교*, 동아일렉콤**

LLC Resonant Converter Analysis Mathematical with Current Doubler Rectifier

Jung Yoon Shin*, Hag Wone Kim*, Kwan Yuhl Cho*, Soon Sang Hwang**, Dong Wook Jung**
Korea National University of Transportation* DongahElecomm R&D Center**

ABSTRACT

본 논문에서는 2차 측에 Current Doubler 정류방식을 적용한 LLC 직렬 공진 컨버터를 제시한다. 일반적으로 LLC 직렬 공진 컨버터에 경우 2차 측에는 유도 성 부하를 사용하지 않는다. 2차 측에 유도 성 부하가 존재하는 경우 방식이 바뀌게 되어, 이는 더 이상 LLC 직렬 공진 컨버터의 특성을 갖지 않기 때문이다. 제안하는 논문에서는 2차 측 출력 인덕터를 Common Mode Choke로 구성한 회로를 수학적 해석을 통해 증명하고, 이를 바탕으로 Matlab / Simulink를 이용하여 타당성을 검증 한다

1. 서론

DC DC 컨버터의 입력이 고전압인 경우 전압 변환 시에 1차 측과 2차 측간에 높은 전압 변환 비율로 인하여 변압기의 손실이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 DC DC 컨버터의 입력을 3 Level로 구성하여 두 개의 컨버터를 직렬로 연결하고, 2차 측엔 Current Doubler 정류방식을 적용하게 된다.^[1] 이때 LLC 직렬 공진 컨버터의 2차 측 Current Doubler 정류방식에 대한 수학적 해석을 한다.

2. 본론

2.1 주 회로 구성

그림 1은 Current Doubler 정류회로 적용 LLC 직렬 공진 컨버터의 주 회로도이다. 1차 측에 5kW LLC 공진 회로 2개가 직렬로 연결 되어 전체 10kW의 대용량이며, 2차 측은 Common Mode Choke를 사용한 Current Doubler 정류회로로 구성 되어 있다.

LLC 공진 컨버터 2차 측에 인덕터와 같은 유도성 부하가 사용되는 Current Doubler 회로를 사용하지 않는 것이 일반적이다. 2차 측에 유도 성 부하가 존재 할 경우 LLC 공진 컨버터의 특성을 갖지 못하게 된다. 그렇기 때문에 기존의 Current Doubler 회로와 달리 2차 측 출력 인덕터를 Common Mode Choke로 사용하여 회로 해석 시 차동 결합하게 되어 유도 성 부하로서 작용하지 않게 된다. 이로 인해 2차 측 출력 인덕터는 LLC 공진 컨버터의 영향을 미치지 않는다.

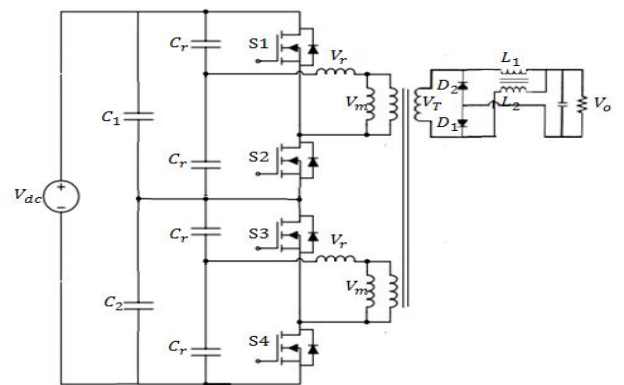


그림 1 Current-Doubler 정류회로가 적용된 LLC 공진 컨버터

Fig. 1 LLC Series Resonant Converter with Current-Doubler Rectifier

2.2 수식화 해석

그림 1의 회로에서 인덕터 L₁의 전압을 V₁, L₂의 전압을 V₂라 할 때 V₁과 V₂는 식 (1)과 같다.

$$V_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \left(\frac{di_2}{dt} \right) \quad (1)$$

$$V_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \left(\frac{di_1}{dt} \right)$$

이 때, 2차 측 토탈 전압은 식 (2)와 같다.

$$V_T = V_1 + V_2 \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하여 식 (3)과 같이 표기 할 수 있다.

$$V_T = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \left(\frac{di_2}{dt} \right) + V_o \quad (3)$$

식 (3)을 식 (4)와 같이 미분에 관하여 정리할 수 있다.

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{V_2}{L_2} + \frac{M}{L_2} \left(\frac{di_1}{dt} \right) \quad (4)$$

전체 V_T 는 출력 인덕터 L_1 과 상호 인덕턴스 M 의 관한 식으로 정리 할 수 있다.

$$V_T = L_1 \frac{di_1}{dt} - \left(-\frac{V_2 M}{L_2} + \frac{M}{L_2} \frac{di_1}{dt} \right) + V_o \quad (5)$$

이 때 $V_2 = V_o$ 이므로 식 (6)에서 V_2 를 V_o 에 관한 식으로 전개하면

$$V_T = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \frac{di_1(t)}{dt} + \left(1 + \frac{M}{L_2} \right) V_o \quad (6)$$

되고, 상호 인덕턴스 특성 식 (8)에서 출력 인덕터 L_1 과 L_2 가 동일 할 때 식(9)와 같으므로 이를 식 (10)에 대입한 경우

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (7)$$

$$M^2 = L^2 \quad (8)$$

$$V_T = (L - L) \frac{di_1(t)}{dt} + (1 + 1) V_o \quad (9)$$

이 된다.

이와 같이 위의 식 (9)를 통해 출력 인덕터 L_1 과 L_2 가 동일하다면 그 값은 0이 된다. 이로서 2차 측에는 인덕터가 없는 것처럼 동작하게 되어 LLC 공진에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

2.3 2차 측 모의해석

표 1 LLC 공진 컨버터의 요구 사양
Table 2 Specifications of LLC series resonant converter

		min	nor	max
입력조건	Vin[total]	660.0	700.0	760.0
	Vin[Vdc]	330.0	350.0	380.0
	P[total][kw]	10		
출력조건		min	nor	max
	Vout[Vdc]	43.5	54.0	58.0
	Iout[A]	172.4	185.2	229.9

그림 2는 full 부하 시 정상상태로 시뮬레이션 한 결과로 1차 측 공진 탱크 전류 I_r , I_m 과 2차 측 출력 인덕터 전류 I_{s1} , I_{s2} , 출력 전류 I_o 를 나타낸 파형이다. 표 1과 같이 전체 입력 전압은 700V 고전압이고, 출력 전압은 54V이다.

위에 회로 적용 시에 트랜스포머와 출력 Common Mode Choke를 제외한 모든 소자는 일반적인 하프 브릿지 LLC 공진 컨버터와 동일한 값으로 설정해야 하고, 트랜스포머는 Current Doubler 정류 회로에 맞게 설계해야 한다.

그림 2의 전류 파형을 볼 때 일반적인 Current Doubler 회로에서는 I_{s1} 과 I_{s2} 가 번갈아 가면서 전류가 흐르기 때문에 위상이 다르게 나타나지만 Common Mode Choke를 사용하면 L_1 과

L_2 에 동일한 방향으로 동시에 전류가 흐르므로 동일한 파형의 모습으로 나오게 되고, 그림 2의 파형을 통해 I_{s1} , I_{s2} 가 동일한 위상으로 나오는 것을 확인 할 수 있다. 또한 I_o 전류는 I_{s1} 과 I_{s2} 전류가 합쳐진 전류이다. 그러므로 I_o 전류는 I_{s1} 과 I_{s2} 전류의 2배로 흐르게 되며 이는 그림 2에 전류 파형으로도 확인 할 수 있다.

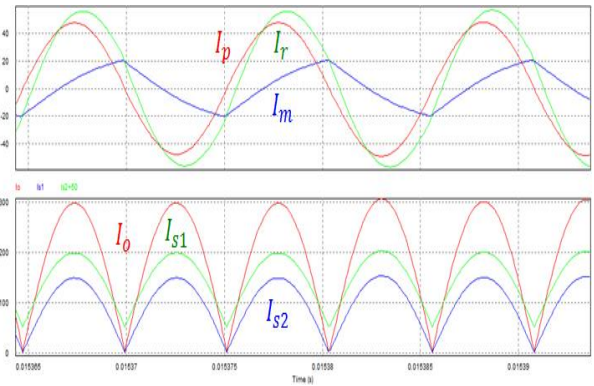


그림 2 공진탱크 전류 및 2차 측 전류 파형
Fig. 2 Resonant tank current and Secondary current waveform

3. 결론

본 논문에서는 LLC 직렬 공진 컨버터의 경우 2차 측에 유도 성 부하가 존재하는 경우 회로 방식이 바뀌게 되고 LLC 공진 컨버터의 특성을 갖지 않게 되므로 2차 측 유도 성 부하를 포함하는 Current Doubler 방식을 사용하지 않는 것이 통상적이었으나 Common Mode Choke를 사용하여 2차 측 출력 인덕터가 일반적인 인덕터처럼 역할을 하지 못하게 되어 실제 회로 동작 시에는 없는 것처럼 동작하게 된다. 이를 수식으로 나타내어 수학적으로 증명하고 해석하여 $L1$ 과 $L2$ 가 동일하다면 그 값이 0이 되어 인덕터가 없는 것처럼 동작한다는 것을 해석하였다. 또한 이를 모의 해석하여 일반적인 LLC 공진 컨버터와 차이 없이 동작한다는 것을 확인 하였고, 2차 측 Common Mode Choke 전류 I_{s1} 과 I_{s2} 의 전류가 위상의 차이 없이 동일했으며, 출력 전류 I_o 는 I_{s1} 과 I_{s2} 전류의 2배가 되는 것 또한 확인 하였다.

이 논문은 동아일렉콤의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 정동욱, 황순상, 박귀철, 김학원 "다입력 변압기와 배전류 정류회로를 적용한 LLC 공진형 컨버터의 특성 분석", 전력전자학회, 전력전자학회 2013학년도 전력전자 학술대회 산업기술세션, pp. 101 102, 2013, 7.
- [2] Bascope, G.V.T., Barbi, I. "Generation of Non Isolated DC DDC PWM Converter Using New Three State Switching Cells", Power Electronics Specialists Conference, 2000, Vol.2, pp858 863