

통합 변압기 사용 다중 출력 LLC 공진형 컨버터의 제어 개선 방안

김승민, 조승진, 최민영, 김승수, 김동희†
 전남대학교 전기공학과

Optimal Control Strategies for Multi-Output LLC Resonant Converter Using Integrated Transformer

Seung-Min Kim, Seung Jin Jo, Min Yeong Choe, Seung-Su Kim and Dong-Hee Kim†
 Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

통합형 변압기를 사용하는 다중 출력 LLC 공진형 컨버터는 동작 주파수 및 위상 제어를 통해 각 출력단의 요구 전압을 충족할 수 있어야 한다. 하지만, 각 출력단은 부하 조건 변동에 따른 영향에 의해 전압이득 특성 및 동작 주파수 대역이 변화하므로 만약 각 출력단의 부하 조건이 서로 상이할 경우, 한 개 출력단의 요구 전압 충족을 위한 동작 주파수 및 위상 변경으로 그 외 출력단은 높은 손실이 발생할 수 있다.

본 논문은 다중 출력 LLC 공진형 컨버터의 각 출력단 부하 변동 조건에서 전체 시스템 효율 향상을 위한 제어 개선 방안을 제시한다. 또한, PSIM 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어 방안에 대한 검증은 진행한다.

1. 서론

최근 에너지 효율 향상과 다양한 전력 요구 사항을 만족시키기 위한 고효율 및 고밀도 전력 변환 장치에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이러한 배경 하에 다수의 출력을 하나의 변압기에 통합하는 다중 출력 LLC 공진형 컨버터 관련 연구가 활발히 진행 중이다^[1]. 이는 여러 부하에 걸쳐 각기 다른 출력 요구 사항을 효과적으로 충족시킬 수 있어 높은 전력 밀도 및 구축 비용 저감에 매우 효과적이다. 또한 통합 변압기 사용으로 발생하는 각 출력단의 유기 전력으로 인한 크로스 레귤레이션 문제 해결을 위해 출력단 정류회로를 스위칭 소자로 구성하여 동작 주파수 및 위상 변경을 통해 출력단의 요구 전압을 충족할 수 있다^[2]. 그러나 부하 조건의 변동에 따라 각 출력단의 전압 이득 특성과 동작 주파수 대역이 변화할 수 있으며, 이로 인해 한 출력단의 요구 전압을 충족시키기 위한 동작 주파수와 위상의 넓은 범위 동작으로 인해 다른 출력단에서 높은 순환전류 발생과 같은 부정적인 결과를 초래할 수 있다. 이러한 문제는 시스템의 전체적인 효율과 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 제어가 적용되는 입출력단의 제어 대상을 구분하고 각 출력단의 부하 크기에 따라 해당 출력단을 위한 제어 변수가 전체 시스템에 미치는 영향을 고려하여 제어의 우선순위를 선정하는 제어 방안이 필요하다.

본 논문은 각 출력단의 부하 변동 조건에서 효율적인 전력 관리 및 안정성을 확보하기 위한 다중 출력 LLC 공진형 컨버터의 제어 방안을 제시한다. 마지막으로, PSIM 시뮬레이션의 thermal module을 활용하여 제안하는 제어 방안을 통한 역률 및 효율 개선에 대한 검증은 수행한다.

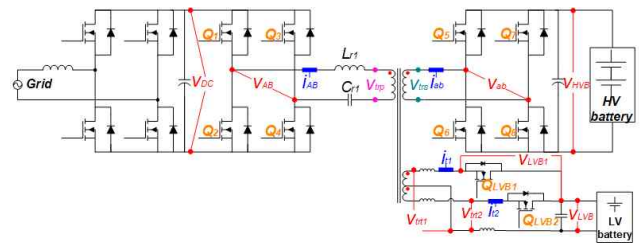


그림 1 통합 변압기 다중 출력 LLC 공진형 컨버터 회로
 Fig. 1 Multi-Output LLC Resonant Converter circuit

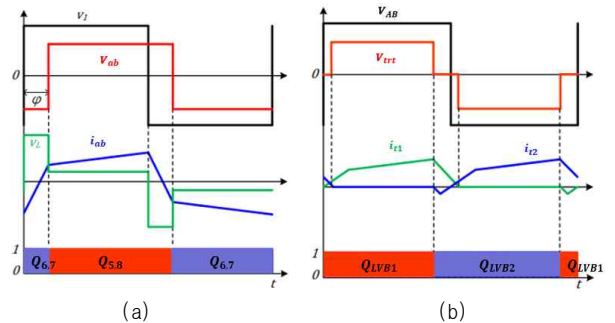


그림 2 풀브리지 및 센터 탭으로 구성된 출력단의 위상 변경 방법
 Fig. 2 Full-Bridge and Center Tap Phase Shift Method

2. 다중 출력 LLC 공진형 컨버터 제어 방안

2.1 통합 변압기 다중 출력 LLC 공진형 컨버터

변압기 통합 LLC 공진형 컨버터에서 입력단 스위치의 스위칭 주파수를 가변할 경우, 변압기로 결합된 두 개의 출력단이 같은 입력단을 공유하기 때문에 동일한 주파수 제어의 영향을 받게 된다. 따라서 제어 변수로 스위칭 주파수만을 사용한다면, 각각의 출력단을 독립적으로 제어할 수 없다. 그러므로 각 출력단을 독립적으로 제어하기 위해서는 추가적인 제어 변수가 필요하며, 각 출력단 스위치의 위상 변경을 통해 독립적인 제어가 가능하다.

그림 2는 변압기 2차측과 연결된 출력단의 제어 방안을 나타낸다. 풀브릿지로 구성된 HVB측 출력단은 그림 2(a)와 같이 총 네 개의 스위칭 소자를 활용하여 위상 변경을 통한 승압 또는 강압 제어가 가능하다. 센터 탭으로 구성된 LVB측 출력단은 그림 2(b)와 같이 두 개의 스위칭 소자를 활용하여 구조적으로 강압 제어가 가능하다. 이를 통해 스위칭 주파수 변경 시 각 출력단은 위상 변경 제어를 통해 크로스 레귤레이션 없이 독립적인 제어가 가능함을 알 수 있다.

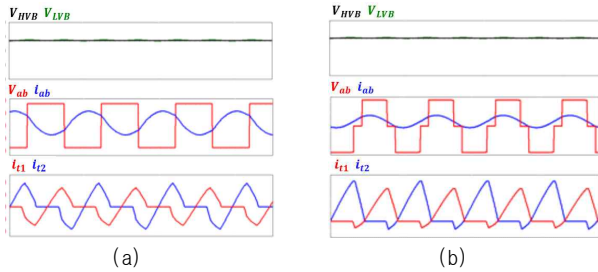


그림 3 동작 주파수 및 스위치 위상 변경에 따른 각 출력단 파형
Fig. 3 Waveform of Each Output Stage According to Operating Frequency and Switch Phase Shift

2.2 부하 크기별 동작 주파수 및 위상에 따른 특징

출력단 정류기의 스위치 위상 제어를 통해 각 출력단은 독립적인 제어가 가능하다. 하지만 각 출력단 스위치의 위상을 극단적으로 변경할 경우 높은 순환전류가 발생하며, 이는 시스템 효율 감소를 초래할 수 있다. 그림 3은 임의의 출력 조건에서 PSIM을 통한 동작 주파수 및 스위치 위상 변경에 따른 각 출력단의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 그림 3(a)는 동작 주파수를 HVB측 출력단의 요구 전압을 만족하도록 가변하며, LVB측 출력단은 위상 변경을 통해 요구 전압을 충족하는 경우를 보여준다. 이때, LVB측 출력단에서 높은 순환전류가 발생한다. 그림 3(b)는 동작 주파수를 LVB측 출력단의 요구 전압을 만족하도록 가변하며, HVB측 출력단은 위상 변경을 통해 요구 전압을 충족하는 경우를 보여준다. 이때, HVB측 출력단에서 높은 순환전류가 발생한다. 이를 통해 특정 출력단에서 발생하는 순환전류를 동작 주파수와 각 출력단의 위상 설정을 통해 조절할 수 있음을 알 수 있다. 이는 중부하 이상의 출력단은 동작 주파수 변경만으로 전압을 충족한 후, 경부하 조건의 출력단은 위상 변경을 통해 조건을 달성하도록 하여 순환전류 저감을 통한 시스템 효율 향상이 가능함을 의미한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 제어 방안의 성능 검증을 위해 표 1의 파라미터를 활용하여 Psim thermal module을 활용한 시뮬레이션을 진행한다. 그림 4는 제어방식에 따른 통상 변압기의 각 부 전압 전류 및 계측 효율의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4(a)는 별도의 기준 없이 제어 변수를 설정한 경우를 나타낸다. 이때, 각 출력단은 부하 크기를 고려 하지 않고 HVB측 출력단에서 많은 위상 변경으로 높은 순환전류가 발생하며, 전체 시스템 손실의 크기가 증가한다. 그림 4(b)는 제안하는 제어 방안을 적용한 경우를 나타낸다. 이때, 각 출력단의 부하 크기를 고려하여 동작 주파수는 높은 전력을 갖는 HVB측 출력단만을 위해 변경하며, 그 이후 위상 변경을 통해 낮은 전력을 갖는 LVB측 출력단의 조건을 만족한다. 이로 인해 전체 시스템에 많은 영향을 끼치는 HVB측은 별도의 위상 변경을 수행하지 않으므로 낮은 순환전류를 보이며, 앞의 경우보다 높은 역률 및 효율을 보인다. 시뮬레이션을 통한 주요 결과는 표 2와 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

V_{DC}	400 V	L_r	23.99 μ H
f_r	100 kHz	L_m	138.5 μ H
P_{HVB}	6.0 kW	V_{HVB}	400 V
P_{LVB}	100 W	V_{LVB}	15 V

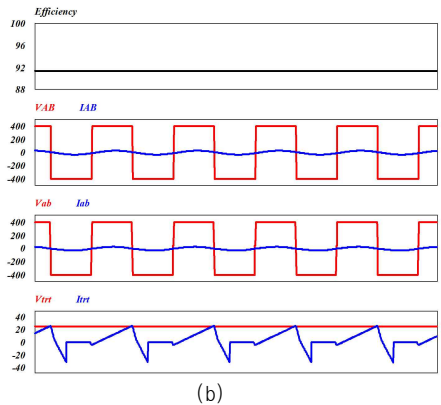
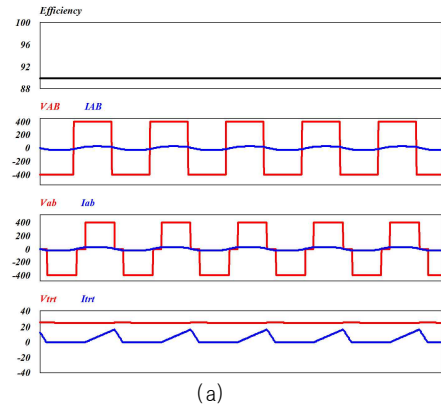


그림 4 제어 방식에 따른 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation Waveform According to Control Method

표 2 PSIM 시뮬레이션을 통한 제어 방식별 성능 지표
Table 2 Performance by Control Method according to PSIM

	Conventional	Proposed
Power Factor	83.7675 [%]	86.1827 [%]
Apparent Power	8.6478 [kVA]	8.4159 [kVA]
Efficiency	89.02 [%]	91.38 [%]

4. 결론

본 논문에서는 순환전류에 의한 효율 감소를 해결하기 위해 출력단의 독립적인 제어를 가능하게 하는 동작 주파수 및 위상 변경을 통한 제어 방안을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어방식을 검증하였으며, 각 출력단의 부하 조건에 맞는 적절한 동작 주파수 및 위상 제어 방안을 통해 기존 대비 2.4 [%]의 전체 시스템 효율의 상승을 확인하였다.

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KETIP) 연구비 지원에 의한 연구임(20026706)

참고 문헌

- [1] Seong-In Kang, Joo-Hoon Kim, Eun-Soo Kim, Jun-Ho Park, Jae-Sam Lee, & Dong-Young Huh (2009). Multi-Output LLC Resonant Converter. THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, 14(4), 323-332.
- [2] Y. Bak, Y. J. Lee and K. -B. Lee, "Dynamic Characteristic Improvement of Phase-Shift Full-Bridge Center-Tapped Converters Using a Model Predictive Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 2, pp. 1488-1497, Feb. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3057038.