

비대칭형 CLLC 양방향 컨버터의 정확한 분석을 위한 TDA 기반 분석 기법

양선호, 박수성, 김래영
한양대학교 에너지전력전자연구실

TDA-based Analysis methods for Accurate Analysis of Asymmetric CLLC Bidirectional Converter

Seon-Ho Yang, Su-Seong Park, Rae-Yong Kim
Department of Energy Power Electronics Control System Lab, Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 비대칭형 CLLC 공진형 컨버터에 대한 분석 정확도 향상을 위한 분석 기법을 제안한다. 분석 기법에 따라 CLLC 공진형 컨버터의 성능에 영향을 미치게 되며, 일반적으로 1차측과 2차측의 특징이 동일한 대칭형 CLLC 컨버터에 대한 분석이 주를 이뤘다. 하지만 양방향 전력 전송시 필요한 전압 범위가 다르기 때문에 전압 이득의 범위가 좁은 대칭형 구조에서는 한계점이 존재한다. 따라서 넓은 전압 이득 범위를 만족할 수 있는 비대칭형 구조의 CLLC 공진형 컨버터에서의 시간 기반 분석 방법을 적용하여 분석하였다. 이는 다양한 분석 기법 중 높은 정확도를 갖는 분석 기법이며, 정확도 검증을 위해 본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

1. 서론

최근 전기자동차, OBC(On-Board Charger) 등 다양한 전력 변환 시스템에서 양방향 DC-DC 컨버터에 대한 수요가 증가하고 있다. 이 중 CLLC 양방향 공진형 컨버터는 소프트 스위칭 동작을 통해 고효율 및 고밀도를 만족할 수 있다. [1]

CLLC 양방향 컨버터는 1차측과 2차측 공진 주파수 특성에 따라 대칭형 구조와 비대칭형 구조로 구분할 수 있다. 대칭형 구조는 1차측과 2차측의 공진 주파수가 동일하며 2차측의 공진 네트워크 설계시 1차측 공진 네트워크 성분에 의해서 값이 결정된다. 하지만 비대칭형 구조는 1차측과 2차측의 공진 주파수가 다르기 때문에 공진 네트워크 설계가 자유로우며, 넓은 전압 범위를 만족할 수 있다.

설계 조건을 만족하는 CLLC 양방향 컨버터를 설계하기 위해서는 공진 네트워크 특성에 따라 변화하는 전압 및 전류에 대한 추정이 선행되어야 한다. 이는 분석 기법의 정확도가 컨버터 설계에 영향을 미치는 것을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 1차측과 2차측의 공진점이 상이한 비대칭형 CLLC 양방향 컨버터를 위한 TDA(Time-Domain Analysis) 해석 기법을 제안한다. 스위칭 주파수 및 부하율에 따라 나타나는 회로 동작을 기반으로 1차측 및 2차측 공진 네트워크 성분에 대한 비선형 상태방정식을 도출하여 전압 및 전류에 대해 시간 영역으로 해석한다. 이 때 CLLC 컨버터 회로에 대한 비선형 방정식은 수치 해석 소프트웨어를 기반으로 분석한다.

2. CLLC 양방향 컨버터 TDA 기반 분석 방법

CLLC 양방향 컨버터는 그림 1과 같이 1차측과 2차측에 full-bridge 구조로 구성되어 있으며, 1차측에서는 인버터 2차측에서는 정류 역할을 한다. 또한 그림 1과 같이 전력 전송의 방향에 따라 모드가 달라지게 된다. 1차측에서 2차측으로 전력 전송될 때 Forward Mode, 2차측에서 1차측으로 전력 전송될 때 Backward Mode로 정의한다. CLLC 공진 네트워크는 5개의 파라미터로 구성된다. 1차측 공진 인덕턴스 및 커패시턴스, 2차측 공진 인덕턴스 및 커패시턴스와 자화 인덕턴스로 구성된다. 이 때, 1차측 공진 네트워크와 2차측 공진 네트워크가 식 (1)과 같은 경우를 대칭형으로 정의하며, 식 (2)의 경우를 비대칭형으로 정의한다.

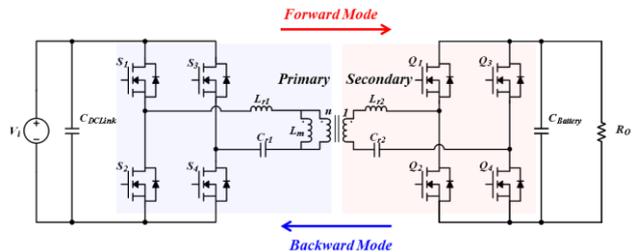


그림1 풀브릿지 CLLC 양방향 공진형 컨버터 토폴로지
Fig.1 Full-Bridge CLLC Bidirectional Converter Topology

$$Lr_1 = n^2 Lr_2, \quad Cr_1 = Cr_2/n^2 \tag{1}$$

$$Lr_1 \neq n^2 Lr_2, \quad Cr_1 \neq Cr_2/n^2 \tag{2}$$

2.1 CLLC 양방향 컨버터 등가 회로 분석

CLLC 양방향 컨버터는 반주기 동안 동작 상태에 따라 총 세가지 P, O, N 구간으로 구분할 수 있다. 그림 2는 서로 다른 구간에서의 등가 회로를 나타낸다. 이 때 CLLC 양방향 컨버터는 공진점을 wr, wm, wr_2 3개를 갖는다. 비대칭형 구조는 $wr \neq wr_2$ 이기 때문에 공진 각 주파수 차이에 의해 위상차가 발생하게 된다. 따라서 위상차를 고려한 각 동작 모드에서의 상태 방정식을 도출한다.

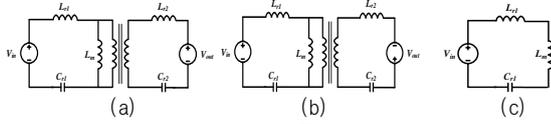


그림2 비대칭형 CLLC 양방향 컨버터 등가회로 (a) P 모드 (b) N 모드 (c) O 모드
Fig.2 Equivalent circuits of the CLLC bidirectional converter in (a) P Mode (b) N Mode (c) O Mode

그림 2는 CLLC 양방향 컨버터의 동작 조건에 따른 등가 회로를 나타내며, 그림 2의 (a) P 모드는 2차측 공진 네트워크 전압이 양의 출력 전압보다 높은 경우이며, 1차측과 2차측에 키르히호프 전압 법칙을 적용하여 식 (3)을 도출하며 이를 미분 방정식으로 표현하면 식 (4)와 같다.^[2]

$$V_i = V_{Lr1} + V_{Cr1} + V_{Lmp}, \quad \frac{V_{Lmp}}{N} = V_{Lr2} + V_{Cr2} + V_o \quad (3)$$

$$Lr_1 Cr_1 \frac{d^2 v_{Cr1}}{dt^2} + v_{Cr1} = V_i - V_{Lmp} \quad (4)$$

$$Lr_2 Cr_2 \frac{d^2 v_{Cr2}}{dt^2} + v_{Cr2} = \frac{V_{Lmp}}{N} - V_o \quad (5)$$

식 (4)와 (5)의 일반해를 구하게 되면 식 (6)과 같이 1차측과 2차측의 공진 커패시터의 전압과 공진 인덕터에 흐르는 전류에 대한 수식으로 나타낼 수 있다. 이 때 k_1, k_2, k_7, k_8 은 회로의 초기 조건에 의해 결정되는 계수이며, 직렬 공진 각 주파수 wr, wr_2 는 식 (7), (8)과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} v_{Cr1}(t) = k_1 \cos(wr \cdot t) + k_2 \sin(wr \cdot t) + V_i - V_{Lmp} \\ i_{Lr1}(t) = C_{r1} w_r \{-k_1 \sin(wr \cdot t) + k_2 \cos(wr \cdot t)\} \\ v_{Cr2}(t) = k_7 \cos(wr_2 \cdot t) + k_8 \sin(wr_2 \cdot t) + \frac{V_{Lmp}}{N} - V_o \\ i_{Lr2}(t) = C_{r2} w_{r2} \{-k_7 \sin(wr_2 \cdot t) + k_8 \cos(wr_2 \cdot t)\} \end{cases} \quad (6)$$

$$wr = \frac{1}{\sqrt{Lr_1 \cdot Cr_1}} \quad (7) \quad wr_2 = \frac{1}{\sqrt{Lr_2 \cdot Cr_2}} \quad (8)$$

그림 2의 (b) N 모드는 2차측 공진 네트워크 전압이 음의 출력 전압보다 높은 경우이며, 1차측과 2차측에 키르히호프 전압 법칙을 적용하여 식 (9)을 도출하며 이를 미분 방정식으로 표현하면 식 (10)와 같다.

$$V_i = V_{Lr1} + V_{Cr1} + V_{Lmn}, \quad \frac{V_{Lmn}}{N} = V_{Lr2} + V_{Cr2} - V_o \quad (9)$$

$$Lr_1 Cr_1 \frac{d^2 v_{Cr1}}{dt^2} + v_{Cr1} = V_i - V_{Lmn} \quad (10)$$

$$Lr_2 Cr_2 \frac{d^2 v_{Cr2}}{dt^2} + v_{Cr2} = \frac{V_{Lmn}}{N} + V_o \quad (11)$$

식 (10)과 (11)의 일반해를 구하게 되면 식 (12)과 같이 1차측과 2차측의 공진 커패시터의 전압과 공진 인덕터에 흐르는 전류에 대한 수식으로 나타낼 수 있다. 이 때 k_5, k_6, k_{11}, k_{12} 은 회로의 초기 조건에 의해 결정되는 계수이다,

$$\begin{cases} v_{Cr1}(t) = k_5 \cos(wr \cdot t) + k_6 \sin(wr \cdot t) + V_i - V_{Lmn} \\ i_{Lr1}(t) = C_{r1} w_r \{-k_5 \sin(wr \cdot t) + k_6 \cos(wr \cdot t)\} \\ v_{Cr2}(t) = k_{11} \cos(wr_2 \cdot t) + k_{12} \sin(wr_2 \cdot t) + \frac{V_{Lmn}}{N} + V_o \\ i_{Lr2}(t) = C_{r2} w_{r2} \{-k_{11} \sin(wr_2 \cdot t) + k_{12} \cos(wr_2 \cdot t)\} \end{cases} \quad (12)$$

그림 2의 (c) O 모드는 정류단 측으로 전력 전송이

안되는 구간이며, O 모드의 등가 회로에 1차측과 2차측에 키르히호프 전압 법칙을 적용하면 식 (13), (14)와 같다.

$$(Lr_1 + Lm)Cr_1 \frac{d^2 v_{Cr1}}{dt^2} + v_{Cr1} = V_i \quad (13)$$

식 (13)의 일반해를 구하게 되면 식 (14)와 같이 공진 커패시터의 전압과 공진 인덕터에 흐르는 전류에 대한 수식으로 나타낼 수 있다. 마찬가지로 k_3, k_4 는 회로의 초기 조건에 의해 결정되는 계수이며, 병렬 공진 각 주파수 wm 은 수식 (15)와 같이 나타낸다.

$$\begin{cases} v_{Cr1}(t) = k_3 \cos(wm \cdot t) + k_4 \sin(wm \cdot t) + V_i \\ i_{Lr1}(t) = Cr_1 w_m \{-k_3 \sin(wm \cdot t) + k_4 \cos(wm \cdot t)\} \end{cases} \quad (14)$$

$$wm = \frac{1}{\sqrt{(Lr_1 + Lm) \cdot Cr_1}} \quad (15)$$

회로의 동작 조건에 따라 CLLC 양방향 컨버터는 앞서 정의된 P, O, N 모드의 조합에 의해 동작된다. 동작 모드에 따라 각각의 방정식을 적용하여 공진 네트워크의 전압 및 전류를 추정할 수 있다.

2.2 CLLC 양방향 컨버터 동작 모드 경계 조건 분류

CLLC 양방향 컨버터는 스위칭 주파수 및 부하 조건에 따라서 다양한 모드가 나타나며 PN, PON, PO, OPO, P, O, NP, NOP, OP의 9가지 주요 모드로 동작한다. 이 중 동작 주파수가 직렬 공진 주파수 보다 작은 영역은 Below 영역이며 PO, PON, PN 동작 모드가 나타난다. 동작 주파수가 큰 경우는 Above 영역으로 NP, NOP, OP의 동작 모드가 나타난다. 또한 동작 주파수가 직렬 공진 주파수와 동일할 때 P 동작 모드로 동작한다.^[3]

동작 조건에 따라서 다양한 동작 모드가 나타나기 때문에 조건에 알맞은 동작 모드에 대한 수식을 적용해야 한다. 이를 위해서 그림 3과 같이 스위칭 주파수 및 부하 조건에 따라 달라지는 2차측 공진 네트워크의 전압과 출력 전압을 비교하여 경계 조건을 분류한다. 분류 알고리즘을 기반으로 동작 조건에 따라 정확한 전류 및 전압이 추정 가능하다.

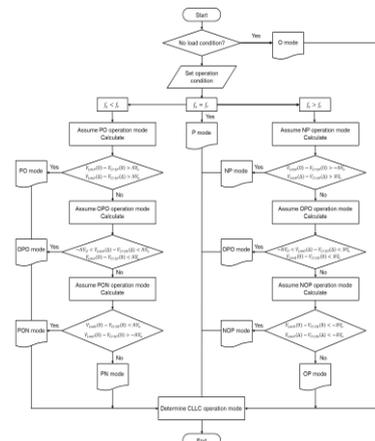


그림3 동작 조건에 따른 CLLC 양방향 컨버터 모드 분류 알고리즘
Fig.3 CLLC bidirectional converter mode classification algorithm based on operating condition

표 1 CLLC 양방향 컨버터 회로 설계 변수 파라미터

Table 1 parameters of the CLLC bidirectional converter

Parameter	Value
입력 전압	750 [V]
1차측 공진 인덕턴스	36 [uH]
1차측 공진 커패시턴스	132 [nF]
자화 인덕턴스	160 [nH]
2차측 공진 인덕턴스	22 [uH]
2차측 공진 커패시턴스	100 [nF]
1차측 공진 주파수	73 [kHz]
2차측 공진 주파수	86.3 [kHz]
변압기 권선 비	1.25

2.3 제안한 기법과 PSIM 시뮬레이션 비교

표1은 제안한 비대칭형 TDA 기법의 유효성 증을 위한 설계 변수이며, 이를 기반으로 소프트웨어 기반 전류와 PSIM 시뮬레이션을 통한 결과값과 비교를 진행한다.

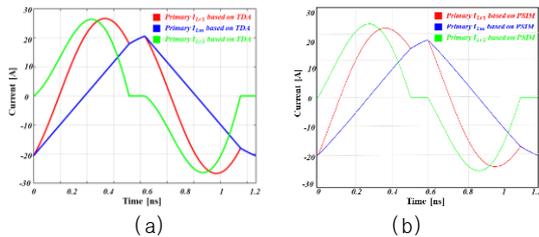


그림5 Below 영역에서의 전류 파형 (a) 제안한 기법 (b) PSIM 시뮬레이션
Fig.5 Current Waveform of operating Below region
(a) TDA method (b) PSIM simulation

그림 5의 (a)는 CLLC 양방향 컨버터가 Below 영역에서 동작 할 때 제안한 TDA 기법 기반의 전류 그래프이며. (b)는 PSIM 시뮬레이션 기반의 전류 그래프를 나타낸다. 공진 인덕턴스의 전류 초기값과 최대값의 최대 오차는 2% 이내이다.

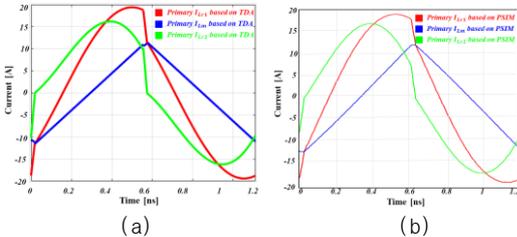


그림6 Above 영역에서의 전류 파형 (a) 제안한 기법 (b) PSIM 시뮬레이션
Fig.6 Current Waveform of operating Above region
(a) TDA method (b) PSIM simulation

그림 6의 (a)는 CLLC 양방향 컨버터가 Above 영역에서 동작 할 때 제안한 TDA 기법 기반의 전류 그래프이며. (b)는 PSIM 시뮬레이션 기반의 전류 그래프를 나타낸다. 공진 인덕턴스의 전류 초기값과 최대값의 최대 오차는 3% 이내이다.

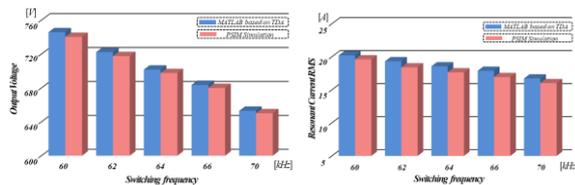


그림7 Below 영역 TDA 기법과 PSIM 결과값 비교 (a) 출력 전압 (b) 전류RMS

Fig.7 Comparison of Below region TDA method and PSIM output (a) Output Voltage (b)Current RMS

그림 7은 Below 영역에서 동작 주파수를 가변하며 TDA 기법과 PSIM 시뮬레이션의 결과값을 비교하였다. 그림 7의 (a)는 출력 전압, (b)는 1차측 전류 RMS의 의미하며 최대 오차는 2% 이내임을 확인하였다.

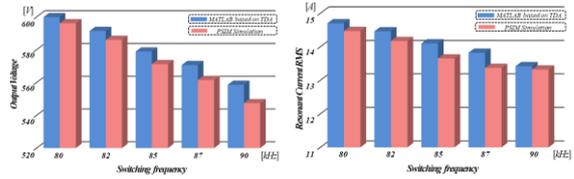


그림8 Above 영역 TDA 기법과 PSIM 결과값 비교 (a) 출력 전압 (b) 전류RMS
Fig.8 Comparison of Above region TDA method and PSIM output (a) Output Voltage (b)Current RMS

그림 8은 Above 영역에서 동작 주파수를 가변하며 TDA 기법과 PSIM 시뮬레이션의 결과값을 비교하였다. 그림 8의 (a)는 출력 전압, (b)는 1차측 전류 RMS의 의미하며 최대 오차는 2% 이내임을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 비대칭형 CLLC 양방향 컨버터의 전압 및 전류의 추정 정확도 향상을 위한 TDA 기법을 제안하였다. TDA 기법은 시간 영역에서 공진 네트워크의 전압과 전류를 비선형 방정식으로 해석하여 높은 정확도를 갖으며, 동작 조건을 가변함에 따라 동작 모드 분류 알고리즘을 적용하여 해석할 수 있다. 제안한 TDA 기법을 통해 도출한 출력 전압 및 전류 RMS값과 PSIM 시뮬레이션 기반 출력 전압 및 전류 RMS값의 최대 오차는 2% 이내의 오차를 가진다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] Chen, Wei, Ping Rong, and Zhengyu Lu. "Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss." IEEE Transactions on industrial electronics 57.9 (2009): 3075–3086.
- [2] Wang, Liangxue, Quanming Luo, and Ting Luo. "A time-domain optimization design methodology for CLLC resonant converter." 2021 IEEE 1st international power electronics and application symposium (PEAS). IEEE, 2021.
- [3] Zhao, Lie, et al. "Design methodology of bidirectional resonant CLLC charger for wide voltage range based on parameter equivalent and time domain model." IEEE Transactions on Power Electronics 37.10 (2022): 12041–12064