

The Loss Analysis of Three-Phase Wye-Wye and Delta-Delta LLC Resonant Converter under the Leg-Open Fault

Hyun-Jin Jin*, Jihun So*, Yoo-Seop Kim*, Yeong-Jun Choi**

*Student, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

**Professor, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

[Abstract]

The LLC resonant converter is widely adopted in industrial applications that require high efficiency and high power density. However, open-circuit faults in power switching devices frequently occur, resulting in power supply interruptions and potential safety hazards. In response, research has been conducted on three-phase LLC resonant converters capable of maintaining operation under fault conditions. Nevertheless, conventional studies have primarily focused on post-fault operational behavior, without addressing the associated power losses which are crucial for enabling continued operation after faults. In particular, since power losses are significantly affected by the transformer winding configuration, it is crucial to analyze transformer loss characteristics under fault conditions. This paper presents a comprehensive analysis and comparison of transformer winding loss, core loss, and core loss of resonant inductor before and after a leg-open fault in three-phase LLC resonant converters with wye-wye and delta-delta transformer connections.

▶ **Key words:** Three-phase LLC Resonant Converter, Leg-open Fault, Wye-Wye Connection, Delta-Delta Connection

[요 약]

LLC 공진형 컨버터는 높은 효율과 전력밀도가 요구되는 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 이에 따라 컨버터의 내부 고장 발생 비율도 증가하고 있으며, 고신뢰성이 요구되는 데이터센터, 항공, 전기차 분야에서는 고장 발생 시에도 동작을 유지할 수 있는 3상 LLC 공진형 컨버터에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 기존 연구는 주로 고장 후 동작 특성에 초점을 맞추었으며, 고장 후 지속적인 운전을 가능하게 하는데 필수적인 전력 손실은 충분히 다루지 않았다. 이에 본 논문에서는 변압기 결선 방식에 따른 고장 전후 손실을 분석하기 위해 동작 특성을 비교하고, 이를 바탕으로 손실에 대한 수학적 수식을 도출한다. 분석 결과, 정상 동작 시에는 델타-델타 결선을 적용한 3상 LLC 공진형 컨버터가 변압기 손실이 더 적지만 고장 발생 시 각 변압기 상에서의 손실이 달라진다. 본 논문은 이러한 손실 분석을 통해 컨버터의 지속적인 운전을 위한 이론적 기반을 마련한다.

▶ **주제어:** 3상 LLC 공진형 컨버터, 레그-개방 고장, 와이-와이 결선, 델타-델타 결선

- First Author: Hyun-Jin Jin, Corresponding Author: Yeong-Jun Choi
- *Hyun-Jin Jin (dkswpffk1219@jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
- *Jihun So (jihun.so@stu.jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
- *Yoo-Seop Kim (rdgcw12@jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
- **Yeong-Jun Choi (yeongjun.choi@jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
- Received: 2025. 05. 30, Revised: 2025. 07. 21, Accepted: 2025. 07. 21.

I. Introduction

LLC 공진형 컨버터는 소프트 스위칭을 구현함으로써 스위칭 손실을 저감하고, 고주파수 동작을 통해 수동 소자의 크기를 줄여 높은 전력밀도를 갖는다. 이러한 특성으로 인해 고효율 및 고전력 밀도를 요구하는 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[1]-[3].

그러나 전력 변환시스템에서는 컨버터를 구성하고 있는 전력 스위칭 장치, 공진 커패시터 등으로 인한 내부 고장이 발생할 수 있으며, 이는 전력 공급 중단과 안정상의 문제로 이어진다[4],[5]. 다양한 고장 유형 중에서는 과전압, 과전류, 과열로 인한 전력 스위칭 장치의 개방 고장 비율이 높다[6].

따라서 고전력 및 고신뢰성의 전력변환장치가 요구되는 재생에너지 시스템, 전기차, 데이터센터, 항공 분야 등에서는 내부 고장 발생 시에도 동작을 유지하는 다상 LLC 공진형 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [7]-[9]. 그러나 기존의 연구는 주로 내부 고장이 발생한 후 3상 LLC 공진형 컨버터 동작 특성 분석에 초점을 맞추고 있으며, 고장 시 발생하는 손실 특성에 대한 연구는 상대적으로 충분하지 않다. 특히, 3상 LLC 공진형 컨버터는 변압기 결선 방식에 따라 전력 손실 및 전류 분배 특성이 직접적으로 영향을 받는다. 한 상의 레그에 개방 고장이 발생하는 경우, 변압기 권선에 흐르는 전류의 불균형을 야기한다. 이는 각 상에서 비대칭적인 권선 손실 및 코어 손실을 초래하므로 전력변환장치의 효율에 영향을 준다. 이에 따라 고장이 발생한 상황에서 안정적인 동작을 달성하기 위해서는 변압기 결선 방식에 따른 고장 조건에서의 동작 특성과 손실 특성을 분석하는 것은 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 1차측과 2차측이 모두 와이 변압기 결선 구조를 가지는 3상 LLC 공진형 컨버터와 1차측과 2차측이 모두 델타 변압기 결선 구조를 가지는 3상 LLC 공진형 컨버터를 대상으로 레그-개방 고장 전후의 동작 특성을 분석한다. 동작 특성 분석을 기반으로 변압기 권선 손실, 코어 손실 그리고 공진 인덕터 손실에 대한 수학적 수식을 도출하여 분석한다. 이후 PLECS 시뮬레이션을 통해 분석 결과를 검증한다.

이를 통해 변압기 결선 방식에 따른 동작 특성과 손실 특성 차이를 제시하고, 향후 보다 높은 신뢰성을 갖는 전력변환장치 설계를 위한 연구의 이론적 기반을 제공하고자 한다.

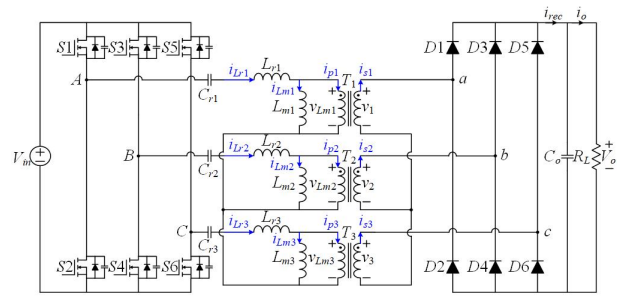


Fig. 1. Three-phase wye-wye LLC resonant converter

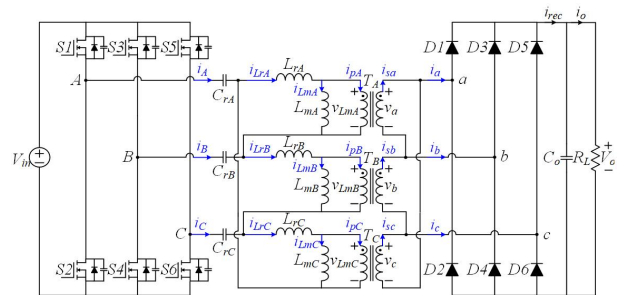


Fig. 2. Three-phase delta-delta LLC resonant converter

II. The Operation Analysis of the Wye-Wye and Delta-Delta Three-Phase LLC Resonant Converter

1. Circuit Description

Fig. 1은 1차측과 2차측의 변압기 결선 방식이 모두 와이인 3상 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 구조를 갖는 3상 LLC 공진형 컨버터를 Y-LLC라 표현하도록 한다. 1차측의 각 레그는 3개의 하프브릿지로 구성되며, 120°의 위상 차이를 가지고 50%의 듀티로 상단과 하단 스위치를 상보 동작시킨다.

공진 탱크는 공진 커패시터 C_{r1}, C_{r2}, C_{r3} , 공진 인덕터 L_{r1}, L_{r2}, L_{r3} 그리고 자화 인덕터 L_{m1}, L_{m2}, L_{m3} 로 구성된다. $i_{Lr1}, i_{Lr2}, i_{Lr3}$ 는 공진 커패시터와 공진 인덕터를 통해 흐르는 공진전류이며, $i_{Lm1}, i_{Lm2}, i_{Lm3}$ 는 자화전류를 나타낸다. i_{p1}, i_{p2}, i_{p3} 는 1차측 변압기 권선에 흐르는 상전류이고, i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} 는 2차측 변압기 권선에 흐르는 상전류를 나타낸다.

Fig. 2는 1차측과 2차측의 변압기 결선 방식이 모두 델타인 3상 LLC 공진형 컨버터를 나타내며 Δ -LLC라 표현하도록 한다. Δ -LLC에서 1차측 스위치 $S_1 \sim S_6$ 은 Y-LLC에 적용되는 스위칭 방식과 동일하게 구동된다.

공진 탱크는 공진 커패시터 C_{rA}, C_{rB}, C_{rC} , 공진 인덕터 L_{rA}, L_{rB}, L_{rC} 그리고 자화 인덕터 L_{mA}, L_{mB}, L_{mC} 로 구성된다.

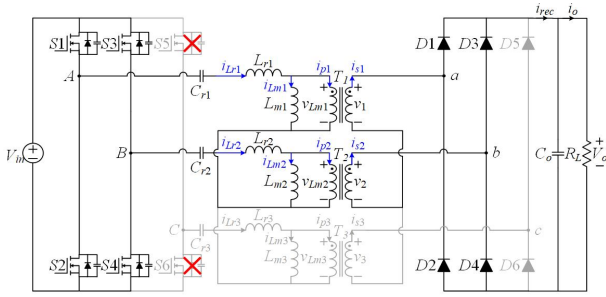


Fig. 3. Three-phase wye-wye LLC resonant converter under leg-open fault

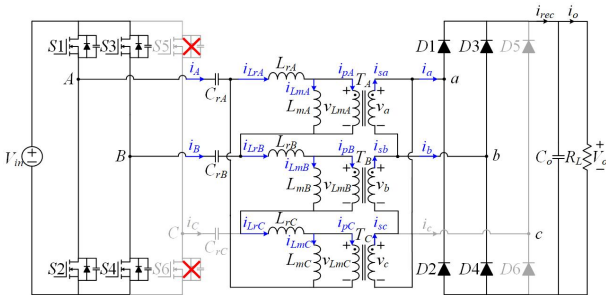


Fig. 4. Three-phase delta-delta LLC resonant converter under leg-open fault

델타 결선의 경우 구조상 선전류와 상전류의 크기가 다르므로 i_A, i_B, i_C 는 공진 커패시터에 흐르는 전류를 나타내고, $i_{LrA}, i_{LrB}, i_{LrC}$ 는 공진 인덕터에 흐르는 전류를 나타내며, $i_{LmA}, i_{LmB}, i_{LmC}$ 는 자화전류를 나타낸다. i_{pA}, i_{pB}, i_{pC} 는 1차측 변압기 권선에 흐르는 상전류이며, i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} 는 2차측 변압기 권선에 흐르는 상전류이고, i_a, i_b, i_c 는 2차측 선전류를 나타낸다.

Fig. 3은 레그-개방 고장 시 Y-LLC를 나타내며, Fig. 4는 레그-개방 고장 시 Δ -LLC를 나타낸다. 레그 C에 개방 고장이 발생하는 경우 $S_1 \sim S_4$ 만 스위칭 동작함으로써 레그 A와 레그 B를 통해 공진 탱크에 전류를 공급한다. 결과적으로 Y-LLC에서는 $i_{Lr3}, i_{Lm3}, i_{p3}, i_{s3}$ 가 영전류가 되면서 C상 변압기에는 전류가 흐르지 않는다. 이에 따라 레그-개방 고장 시 Y-LLC에서는 A상 변압기와 B상 변압기가 직렬연결 구조로 바뀐다. 이는 2차측 a와 b상의 변압기도 직렬연결 구조로 바뀌게 되면서 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2차측 c상의 변압기에도 전류가 흐르지 않는다. Δ -LLC에서는 i_C, i_c 가 영전류가 되지만 결선의 구조상 모든 변압기 상에 전류가 흐른다. 따라서 레그-개방 고장 시 Δ -LLC에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 B상과 C상의 변압기가 직렬 연결되고, A상과 병렬연결 구조로 바뀐다. 이러한 결선의 연결 구조 변화는 레그-개방 고장 시 동작 특성과 손실 특성에 영향을 미친다.

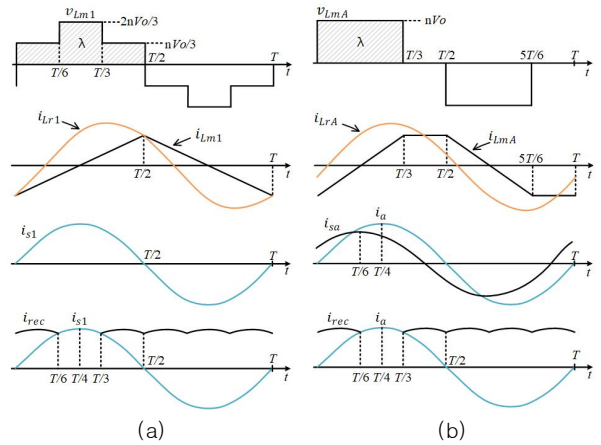


Fig. 5. Operation waveforms (a)Y-LLC (b) Δ -LLC

2. Operation Comparison

Y-LLC와 Δ -LLC는 구조적인 차이에 의해 다른 동작 특성을 보이므로 고장 전후 손실을 분석하기 위해서 각 결선 방식에 따른 동작 특성을 비교한다. 정상 동작 시 자화 인덕턴스 전압의 동작 특성과 레그-개방 고장 시 상별 전류 및 전압의 동작 특성은 결선 방식에 따라 달라진다. 이러한 동작 특성의 차이는 각 결선 방식에서 발생하는 손실에 직접적인 영향을 미친다.

2.1 Operation Analysis of Y-LLC and Δ -LLC

레그-개방 고장 발생 유무와 변압기 결선 방식에 상관없이 1차측 레그와 2차측 레그에 흐르는 전류는 같으므로 Y-LLC와 Δ -LLC에서 각 변압기 상에 흐르는 전류와 인가되는 전압에 대한 동작 특성을 분석한다.

Fig. 5(a)는 정상 동작 시 Y-LLC의 주요 동작 특성을 나타내며, Fig. 5(b)는 정상 동작 시 Δ -LLC의 주요 동작 특성을 나타낸다. Y-LLC에서 변압기 상전압 v_{Lm1} 은 스위칭 상태에 따라 $nV_o/3, 2nV_o/3$ 의 크기를 가지며, 한 주기에 60° 구간씩 단계적으로 변하는 6-스텝 특성을 보인다. Δ -LLC에서는 변압기의 상전압 V_{LmA} 가 nV_o 의 크기를 갖는 구형파로 동작한다. 공진전류는 정현파로 동작하며, 스위칭 주파수는 공진주파수와 일치한다. Y-LLC에서 자화전류는 삼각파로 동작한다.

그러나 Δ -LLC에서는 자화 인덕턴스 전압이 영전압인 구간에서 자화전류가 일정한 구간이 존재하므로 사다리꼴 파형의 동작 특성을 보인다. Δ -LLC에서 선전류는 상전류의 $\sqrt{3}$ 배이고 30° 위상차를 갖는다. 2차측 다이오드 정류기를 거쳐 정류된 전류 i_{rec} 은 i_a 가 120° 위상 차이로 i_b 와 i_c 가 흐르기 때문에 60° 간격으로 도통 구간이 형성된다. 따라서 한 주기에 6개의 펄스를 갖는 6-펄스 정류 파형의 동작 특성을 갖는다.

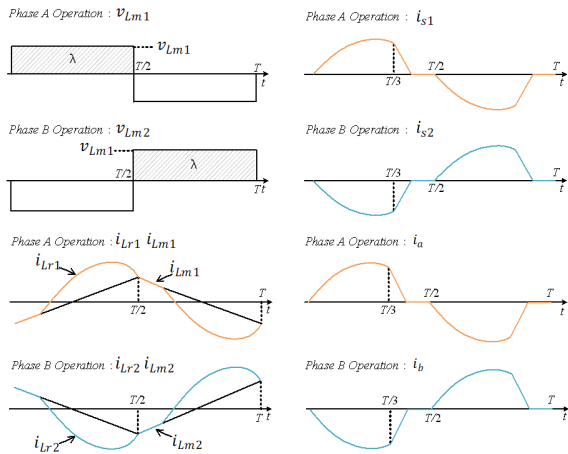


Fig. 6. Operation waveforms of Y-LLC under leg-open fault

2.2 Operation Analysis of Y-LLC and Δ-LLC under Leg-Open Fault

Fig. 6은 레그-개방 고장 시 Y-LLC의 동작 특성을 나타낸다. Y-LLC의 A상과 B상의 변압기는 직렬 연결되므로 각 변압기에 흐르는 전류와 인가되는 전압의 크기는 서로 동일하고, 반대 위상으로 동작한다. Fig. 7은 레그-개방 고장 시 Δ-LLC의 동작 특성을 나타낸다. Δ-LLC의 B상과 C상의 변압기는 직렬 연결되고 A상과 병렬 연결되므로 B상과 C상의 상전압의 합은 A상의 상전압과 동일하다. 따라서 B상과 C상에는 같은 크기의 전류가 흐르고 A상에는 두 배로 큰 전류가 흐른다. 레그-개방 고장 시 Y-LLC와 Δ-LLC에서 스위칭 주파수는 공진주파수보다 낮아지므로 공진전류는 비정상파 형태로 동작한다. 이로 인해 각 변압기에 흐르는 상전류와 선전류도 비정상파 형태로 동작한다.

III. The Loss Comparison between Wye-Wye and Delta-Delta Three-Phase LLC Resonant Converter

1. The Loss Comparison between Y-LLC and Δ-LLC

3상 LLC 공진형 컨버터의 손실은 주로 스위칭 소자의 도통 손실과 스위칭 손실, 자기 소자의 권선 손실과 코어 손실로 구성된다. 동일한 출력 전력과 전압 및 스위칭 주파수 조건에서는 두 결선 방식에서의 1차측 스위치 전류와 양단 전압이 동일하다. 따라서 결선 방식에 따른 변압기 권선 손실, 코어 손실, 공진 인덕터 코어 손실을 포함하는 변압기 손실을 비교한다.

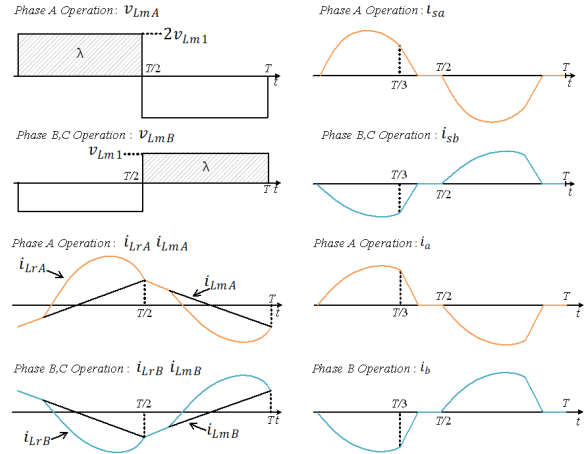


Fig. 7. Operation waveforms of Δ-LLC under leg-open fault

1.1 Winding Losses of Transformer

변압기의 권선 손실은 1차 및 2차 권선 손실을 포함한다. 권선에 흐르는 공진전류를 구하기 위해서 자화전류를 계산해야 하며, 자화전류는 자화 인덕턴스 전압을 시간에 대해서 적분한 값으로 표현된다. 동작 특성 분석에 따라 Y-LLC에서 자화전류는 삼각파로 동작하므로 자화전류의 rms값 I_{Lm1} 은 식 (1)과 같다.

$$I_{Lm1} = \frac{nV_oT}{3\sqrt{3}L_m} \quad (1)$$

이때, n 은 턴수비, V_o 는 출력전압, T 는 스위칭 주기, L_m 은 자화 인덕턴스이다. 2차측 상전류의 rms값 I_{s1} 은 식 (2)와 같고, 이를 이용하여 Y-LLC의 변압기 권선 손실 $P_{winding_Y}$ 를 구하면 식 (3)과 같다.

$$I_{s1} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}}I_o \quad (2)$$

$$P_{winding_Y} = \left(\frac{1}{9}\left(\frac{nV_oT}{L_m}\right)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{\pi I_o}{n}\right)^2\right)R_{pri} + \frac{1}{6}(\pi I_o)^2R_{sec} \quad (3)$$

여기서 R_{pri} 는 1차측 권선 AC 저항이며 R_{sec} 는 2차측 권선 AC 저항이다. 권선 AC 저항은 Dowell 방정식을 적용한다[10].

Δ-LLC에서 자화전류는 사다리꼴 파형으로 동작하므로 rms값 I_{LmA} 을 나타내면 식 (4)와 같다.

$$I_{LmA} = \frac{\sqrt{5}}{3} \times \frac{nV_oT}{6L_m} \quad (4)$$

2차측 상전류의 rms값은 식 (2)에서 $\sqrt{3}$ 을 나누어 나타내며, 1차측 상전류는 식 (2)에서 턴수비를 고려하여 유도된다. 따라서 Δ-LLC의 변압기 권선 손실 $P_{winding_\Delta}$ 은 식 (5)와 같다.

$$P_{winding\Delta} = \left(\frac{5}{108} \left(\frac{nV_o T}{L_m}\right)^2 + \frac{1}{18} \left(\frac{\pi I_o}{n}\right)^2 R_{pri} + \frac{1}{18} (\pi I_o)^2 R_{sec}\right) \quad (5)$$

1.2 Core Losses of Transformer

Y-LLC와 Δ -LLC 변압기에 흐르는 전류는 비정현파이므로 식 (6)에 나타난 Steinmetz 방정식을 적용한다.

$$P_{core} = \frac{1}{T} \int_0^T k_i \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^\alpha (\Delta B)^{\beta-\alpha} dt \quad (6)$$

이때, k_i 는 변압기 재료에 따른 파라미터이며, ΔB 는 자속의 변화량이다. ΔB 는 $2B_{max}$ 로 표현하며, B_{max} 는 최대 자속을 의미한다. 변압기 코어 손실은 자속의 크기에 영향을 받으며, 자속은 패러데이 법칙에 따라 자화 인덕턴스 전압을 시간에 대해 적분한 값으로 표현된다. 따라서 Y-LLC에서의 최대 자속 B_{max_Y} 은 식 (7)과 같고, Δ -LLC에서 최대 자속 B_{max_Δ} 은 식 (8)과 같다.

$$B_{max_Y} = \frac{2 \int_0^{T/3} V_{LmA} dt + \int_{T/3}^{2T/3} V_{LmA} dt}{2N_s A} = \frac{2nV_o T}{9N_s A} \quad (7)$$

$$B_{max_\Delta} = \frac{\int_0^{T/2} V_{LmA} dt}{2N_s A} = \frac{nV_o T}{4N_s A} \quad (8)$$

1.3 Core Loss of Resonant Inductor

공진 인덕터에 흐르는 전류는 정현파이므로 식 (9)와 같이 간소화된 Steinmetz 방정식을 적용한다.

$$P_{core} = K f^\alpha B_m^\beta \quad (9)$$

여기서 K 는 변압기 코어 재료의 파라미터 값이고, f 는 스위칭 주파수를 의미한다. B_m 은 공진 인덕터에 대한 식으로 표현한 최대 자속이며 식 (10)과 같다.

$$B_m = \frac{L_r I_{r,peak}}{N_s A} \quad (10)$$

공진전류 최대값 $I_{r,peak}$ 는 자화전류 최대값 $I_{m,peak}$ 크기와 1차측 상전류 최대값 $I_{pri,peak}$ 크기의 합과 같다. 따라서 Y-LLC의 공진 인덕터 코어 손실 P_{i_Y} 은 식 (11)과 같고, Δ -LLC의 공진 인덕터 코어 손실 P_{i_Δ} 은 식 (12)와 같이 나타난다.

$$P_{i_Y} = 3m_{Lr} K f^\alpha \left(\frac{L_r}{N_s A} \sqrt{\frac{1}{9} \left(\frac{nV_o T}{L}\right)^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{\pi I_r}{n}\right)^2} \right)^\beta \quad (11)$$

$$P_{i_\Delta} = 3m_{Lr} K f^\alpha \left(\frac{L_r}{N_s A} \sqrt{\frac{1}{36} \left(\frac{nV_o T}{L}\right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{\pi I_r}{n}\right)^2} \right)^\beta \quad (12)$$

2. The Loss Comparison between Y-LLC and Δ -LLC under Leg-Open Fault

2.1 Winding Losses of Transformer

레그-개방 고장 시 Y-LLC에서 자화전류는 삼각파로 동작하므로 자화전류의 rms값 $I_{Lm1,f}$ 은 식 (13)과 같다.

$$I_{Lm1,f} = \frac{nV_o T}{2\sqrt{3}L_m} \quad (13)$$

출력전류 $I_{o,f}$ 는 선전류에 대한 식으로 표현되며, 비정현파로 동작하므로 식 (14)와 같이 유도되며, 2차측 상전류의 rms값 $I_{s1,f}$ 을 계산하면 식 (15)와 같다.

$$I_{o,f} = \frac{1}{\pi} \left(\int_0^{2\pi/3} I_{s1,f} \sin t dt + \frac{\sqrt{3}}{48} \pi I_{s1,f} \right) \quad (14)$$

$$I_{s1,f} = I_{o,f} \sqrt{\frac{\pi^2}{2} + \frac{\pi}{3}} \quad (15)$$

따라서 레그-개방 고장 시 Y-LLC의 A상에 대한 변압기 권선 손실 $P_{winding,Y_{A,f}}$ 은 식 (16)과 같다.

$$P_{winding,Y_{A,f}} = \left(\frac{1}{3} \left(\frac{nV_o T}{2L_m} \right)^2 + \left(\frac{I_{o,f}}{n} \sqrt{\frac{\pi^2}{2} + \frac{\pi}{3}} \right)^2 \right) R_{pri} + \left(I_{o,f} \sqrt{\frac{\pi^2}{2} + \frac{\pi}{3}} \right)^2 R_{sec} \quad (16)$$

레그-개방 고장 시 Δ -LLC에서 자화전류의 rms 값 $I_{Lm,f}$ 은 식 (17)과 같고, A상에 대한 자화전류의 rms값은 γ_1 이 1이고, B와 C상에 대한 자화전류의 rms값은 γ_1 이 2인 경우이다.

$$I_{Lm,f} = \frac{nV_o T}{2\gamma_1 \sqrt{3}L_m} \quad (17)$$

레그-개방 고장 시 Δ -LLC에서 각 상전류에 대한 rms 값 $I_{sa,f(s)}$ 을 계산하면 식 (18)과 같다.

$$I_{sa,f(s)} = I_{o,f} \sqrt{\frac{2\pi^2}{9} + \frac{4\pi}{27}}, I_{sb,f(s)} = I_{o,f} \sqrt{\frac{\pi^2}{18} + \frac{\pi}{27}} \quad (18)$$

식 (18)에서 턴수비를 고려하면 1차측 상전류이며, 레그-개방 고장 시 Δ -LLC에서 A상 변압기 권선 손실 $P_{winding,\Delta_{A,f}}$ 은 식 (19)이고, B상과 C상에 대한 변압기 권선 손실 $P_{winding,\Delta_{B,f}}$ 은 식 (20)과 같다.

$$P_{winding,\Delta_{A,f}} = \left(\frac{1}{3} \left(\frac{nV_o T}{2L_m} \right)^2 + \left(\frac{I_{o,f}}{n} \sqrt{\frac{2\pi^2}{9} + \frac{4\pi}{27}} \right)^2 \right) R_{pri} + \left(I_{o,f} \sqrt{\frac{2\pi^2}{9} + \frac{4\pi}{27}} \right)^2 R_{sec} \quad (19)$$

$$P_{winding,\Delta_{B,f}} = \left(\frac{1}{3} \left(\frac{nV_o T}{4L_m} \right)^2 + \left(\frac{I_{o,f}}{n} \sqrt{\frac{\pi^2}{18} + \frac{\pi}{27}} \right)^2 \right) R_{pri} + \left(I_{o,f} \sqrt{\frac{\pi^2}{18} + \frac{\pi}{27}} \right)^2 R_{sec} \quad (20)$$

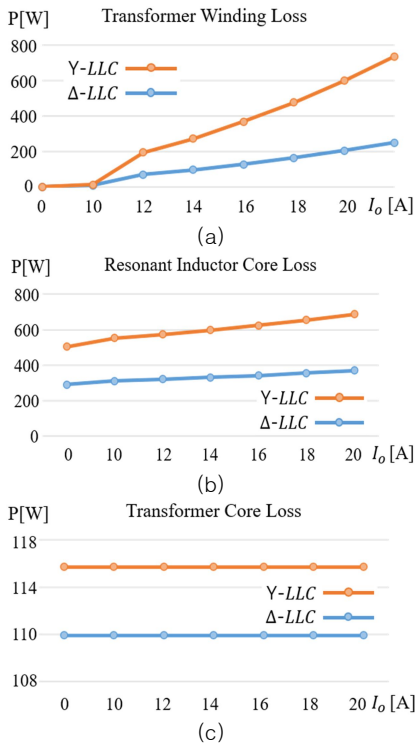


Fig. 8. Loss comparison between Y-LLC and Δ-LLC before leg-open fault (a) winding loss of transformer (b) core loss of resonant inductor (c) core loss of transformer

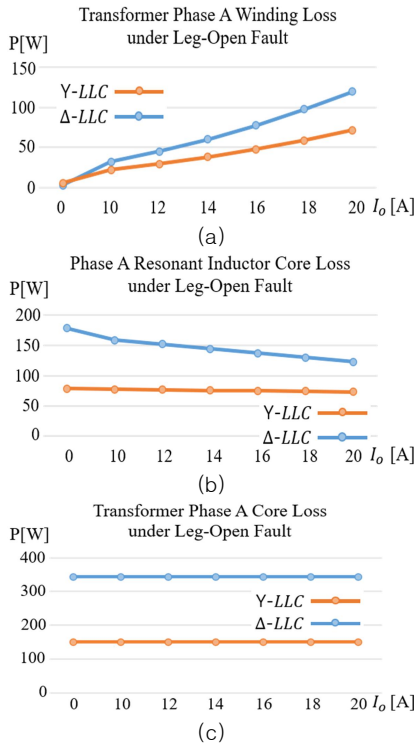


Fig. 9. Phase A Loss comparison between Y-LLC and Δ-LLC under leg-open fault (a) winding loss of transformer (b) core loss of resonant inductor (c) core loss of transformer

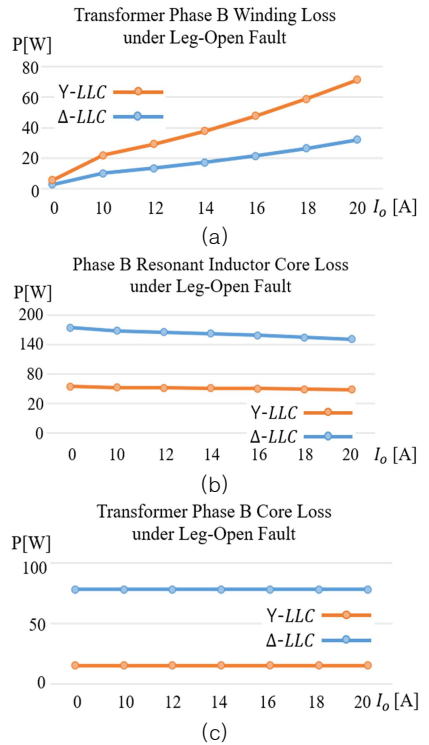


Fig. 10. Phase B Loss comparison between Y-LLC and Δ-LLC under leg-open fault (a) winding loss of transformer (b) core loss of resonant inductor (c) core loss of transformer

2.2 Core Losses of Transformer

레그-개방 시 Y-LLC의 최대 자속 $B_{max_{Y,f}}$ 은 식 (21)과 같고 이를 이용하여 레그-개방 시 Y-LLC의 A상과 B상에 대한 변압기 코어 손실을 구하면 식 (22)와 같다.

$$B_{max_{Y,f}} = \frac{n V_o T}{4 N_s A} \quad (21)$$

$$P_{core,Y_f} = m \frac{k_i}{T} \left(\frac{n V_o T}{2 N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (22)$$

레그-개방 시 Δ-LLC의 최대 자속 $B_{max_{\Delta,yf}}$ 은 식 (23)과 같이 나타나며, y 는 A, B, C상을 의미한다. γ_3 가 1일 때 y 는 A이며, γ_3 가 2일 때 y 는 B와 C이다.

$$B_{max_{\Delta,yf}} = \frac{n V_o T}{4 \gamma_3 N_s A} \quad (23)$$

따라서 레그-개방 시 Δ-LLC의 A상에 대한 변압기 코어 손실 $P_{core,\Delta Af}$ 은 식 (24)이며, B상과 C상에 대한 변압기 코어 손실 $P_{core,\Delta Bf}$ 은 식 (25)와 같다.

$$P_{core,\Delta Af} = m \frac{k_i}{T} \left(\frac{n V_o T}{2 N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (24)$$

$$P_{core,\Delta Bf} = m \frac{k_i}{T} \left(\frac{n V_o T}{4 N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (25)$$

2.3 Core Loss of Resonant Inductor

정상 동작 시와 달리 레그-개방 시 공진 인덕터에 흐르는 전류는 비정현파로 동작하므로 식 (6)을 적용하여 Y-LLC와 Δ-LLC의 공진 인덕터 코어 손실을 계산한다. 결과적으로 Y-LLC의 공진 인덕터 코어 손실 $P_{i_{Y,f}}$ 은 식 (26)과 같다.

$$P_{i_{Y,f}} = m \frac{k_i}{T} \left(\frac{2 L_r I_{Lr,peak_{Yf}}}{N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (26)$$

레그-개방 고장 시 Δ-LLC에서 A상에 대한 공진 인덕터 전류의 최댓값 $I_{Lr,peak_{\Delta,Af}}$ 은 식 (27)과 같고, B상과 C상에 대한 공진 인덕터 전류의 최댓값 $I_{Lr,peak_{\Delta,Bf}}$ 은 식 (28)과 같다.

$$I_{Lr,peak_{\Delta,Af}} = \sqrt{I_{LmA,f}^2 + I_{sa,f}^2} \quad (27)$$

$$I_{Lr,peak_{\Delta,Bf}} = \sqrt{I_{LmB,f}^2 + I_{sb,f}^2} \quad (28)$$

따라서 레그-개방 고장 시 Δ-LLC의 A상에 대한 공진 인덕터 코어 손실 $P_{i_{\Delta,Af}}$ 은 식 (29)이며, B상과 C상에 대한 공진 인덕터 코어 손실 $P_{i_{\Delta,Bf}}$ 은 식 (30)과 같다.

$$P_{i_{\Delta,Af}} = V \frac{k_i}{T} \left(\frac{2 L_r I_{Lr,peak_{\Delta,Af}}}{N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (29)$$

$$P_{i_{\Delta,Bf}} = V \frac{k_i}{T} \left(\frac{2 L_r I_{Lr,peak_{\Delta,Bf}}}{N_s A} \right)^{\beta-\alpha} \int_0^{T/2} 2 \left| \frac{n V_o}{N_s A} \right|^\alpha dt \quad (30)$$

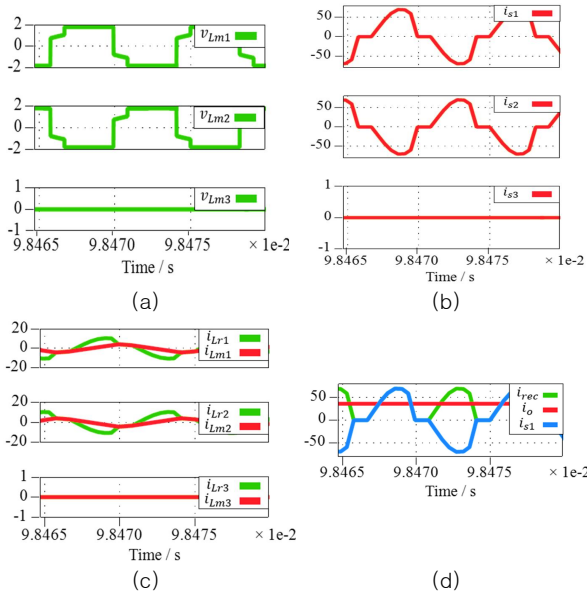


Fig. 11. Simulation results of Y-LLC under the leg-open fault (a) phase voltage (b) secondary phase current and line current (c) resonant current and magnetizing current (d) output current

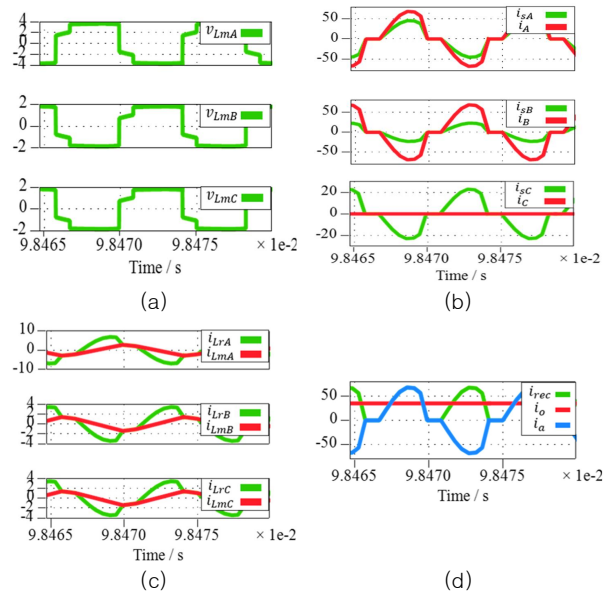


Fig. 12. Simulation results of Δ-LLC under the leg-open fault (a) phase voltage (b) secondary phase current and line current (c) resonant current and magnetizing current (d) output current

Table 1. System Environment

Parameter	Value
Input Voltage(V_i)	400V
Output Voltage(V_o)	48V
Switching frequency(f_s)	120kHz
Magnetizing inductance(L_m)	240uH
Leakage inductance(L_r)	60uH
Resonant capacitance(C_r)	87nF

Fig. 8은 정상 동작 시 Y-LLC와 Δ-LLC의 손실 비교를 보여주며, Y-LLC가 Δ-LLC보다 변압기 손실이 더 적다.

레그-개방 고장 시 Y-LLC에서는 C상에 전류가 흐르지 않지만 Δ-LLC에서는 B상과 C상에 동일한 전류와 전압이 발생하므로 두 상의 변압기 손실도 동일하게 발생한다. 따라서 레그-개방 고장 시 손실 특성은 A상과 B상만 표현한다. Fig. 9는 레그-개방 고장 시 A상에 대한 손실 비교를, Fig. 10은 B상에 대한 손실 비교를 보여준다. 레그 C에 개방 고장이 발생한 경우 Δ-LLC A상에 가장 많은 전류가 흐르므로 더 큰 변압기 권선 손실이 발생한다. 공진 인덕터 코어 손실과 변압기 코어 손실도 변압기 권선 손실 특성과 마찬가지로 한 상에 대해 Δ-LLC에서 더 큰 손실이 발생하는 경향성이 나타난다.

IV. Simulation Results

분석 내용을 검증하기 위한 시뮬레이션 파라미터는 Table 1과 같다. 본 논문의 파라미터는 데이터 센터 환경에서 배터리와 48V 서버 보드 간 DC/DC 컨버터에 요구하는 사양을 기준으로 설정하였다[11]-[13]. Fig. 11은 레그-개방 고장 시 Y-LLC의 상전압, 공진전류, 자화전류 그리고 2차측 다이오드 정류기에 흐르는 시뮬레이션 파형을 나타낸다. Fig. 11(a)는 각 위상의 상전압을 보여주며, 레그 C에 개방 고장이 발생함에 따라 V_{Lm3} 는 영전압이 된다. Fig. 11(b)는 2차측 상전류에 대한 파형이며 i_{s3} 는 영전류가 된다. 이에 따라 레그-개방 고장 시 Y-LLC는 A상과 B상에만 전류가 흐르며 크기는 동일하고, 동위상을 갖는다. Fig. 11(c)는 자화전류와 공진전류를 보여주며, 공진 주파수보다 낮은 주파수에서 동작하고 비정현파로 동작한다. 결과적으로 Fig. 11(d)에 나타난 바와 같이 2차측 정류 전류도 비정현파의 형태를 가진다.

Fig. 12는 레그-개방 고장 시 Δ-LLC의 상전압, 공진 전류, 자화전류 그리고 2차측 다이오드 정류기에 흐르는 전류를 나타낸다. Fig. 12(a)는 각 위상의 상전압을 나타내며 B상과 C상의 상전압의 합은 A상의 상전압 크기와 동일하다. 이는 레그-개방 고장 시 B상과 C상은 직렬연결 구조로, A상은 병렬연결 구조로 변함에 따라 나타나는 동작 특성임을 검증하였다. Fig. 12(b)와 Fig. 12(c)에 나타난

바와 같이 레그-개방 고장 시 Δ -LLC에서는 Y-LLC와 달리 변압기의 모든 상에 전류가 흐른다. 스위칭주파수는 공진주파수보다 낮아짐에 따라 공진전류는 비정현파로 동작한다. 이에 따라 Fig. 12(b)와 Fig. 12(d)에 나타난 바와 같이 2차측 선전류, 상전류 그리고 정류 전류도 비정현파로 동작함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

V. Conclusions

본 논문에서는 Y-LLC와 Δ -LLC 결선 방식에 대한 레그-개방 고장 전후의 동작 특성을 분석하고, 이를 기반으로 변압기 권선 손실, 변압기 코어 손실 그리고 공진 인덕터 코어 손실을 비교 분석하였다. 정상 동작 시 Δ -LLC는 자화전류와 상전류가 Y-LLC에 비해 작기 때문에 변압기 권선 손실과 공진 인덕터 코어 손실이 더 적다. 또한, 두 결선 방식에서 최대 자속은 큰 차이가 없어 변압기 코어 손실의 차이는 미미하다. 레그 C에서 개방 고장이 발생한 경우, A상에서 Δ -LLC가 더 큰 변압기 권선 손실이 나타나지만 고장 상인 C상과 전기적으로 연결된 B상에서는 Y-LLC에서 더 큰 변압기 권선 손실이 발생한다. 이에 따라 동일한 출력 전력과 전압 및 스위칭 주파수 조건에서 정상 동작 시 Δ -LLC가 변압기 손실이 더 적어 고효율이 요구되는 어플리케이션에 적합하다. 그러나 레그-개방 고장 시 상별 손실 특성이 다르게 나타나므로 고신뢰성이 요구되는 컨버터 설계 시 정상 동작 시 효율뿐만 아니라 본 논문을 통해 도출한 수학적 수식을 기반으로 고장 상황에서의 손실 특성까지 고려하여 결선 방식을 선정해야 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00405278).

REFERENCES

- [1] F. Musavi, M. Craciun, D. S. Gautam, W. Eberle and W. G. Dunford, "An LLC Resonant DC-DC Converter for Wide Output Voltage Range Battery Charging Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5437-5445, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2241792
- [2] J. Guan et al., "A High Efficiency Δ -Lr-Y Type Three-Phase Interleaved LLC Converter With Less Transformer Loss," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 9, pp. 11152-11168, Sept. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3283391
- [3] S. A. Arshadi, M. Ordonez, W. Eberle, M. Craciun and C. Botting, "Three-Phase LLC Battery Charger: Wide Regulation and Improved Light-Load Operation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 2, pp. 1519-1531, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3006422
- [4] L. Ferreira Costa and M. Liserre, "Failure Analysis of the dc-dc Converter: A Comprehensive Survey of Faults and Solutions for Improving Reliability," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 42-51, Dec. 2018, doi: 10.1109/MPEL.2018.2874345
- [5] W. Zhang, D. Xu, P. N. Enjeti, H. Li, J. T. Hawke and H. S. Krishnamoorthy, "Survey on Fault-Tolerant Techniques for Power Electronic Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 12, pp. 6319-6331, Dec. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2304561
- [6] H. Wang, X. Pei, Y. Wu, Y. Xiang and Y. Kang, "Switch Fault Diagnosis Method for Series-Parallel Forward DC-DC Converter System," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 6, pp. 4684-4695, June 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2866109
- [7] W. Wang, Y. Liu, P. Zhang, Y. Yuan, J. Zhao and P. C. Loh, "A Fault-Tolerant LLC Converter With High Reliability and Low Cost for Two-Stage Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 8, pp. 9647-9659, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3281601
- [8] P. P. Nachankar, H. M. Suryawanshi, P. Chaturvedi, D. Atkar, C. L. Narayana and D. Govind, "Design of Interleaved Three-Phase DC Transformer With Ingenious Control for Modern Data Centers," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 6, pp. 6889-6899, Nov.- Dec. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3292808
- [9] D. R. Linares, A. D. Expósito and M. Vasić, "High-Gain High-Frequency Three-Phase LLC Resonant Converter Design Based on the Wye-Delta Transformer for Aircraft Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 4, pp. 4367-4383, April 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3339973
- [10] Dowell, P.L.: Effects of eddy currents in transformer windings. Proc. Inst. Electr. Eng. (1996); 113(8), 1387-1394C.
- [11] Fei, R. Gadelrab, Q. Li and F. C. Lee, "High-Frequency Three-Phase Interleaved LLC Resonant Converter With GaN Devices and Integrated Planar Magnetics," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7, no. 2, pp. 653-663, June 2019
- [12] J. Cao, X. Zhang, P. Rao, S. Zhou, F. Zhou and Q. Zhang, "Design of Three-Phase Delta-Delta LLC Resonant Converter," 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Gijon, Spain,

2020, pp. 1-5

- [13] A. Lordoglu, M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas and S. Dusmez, "Design and Optimization of Three-Phase LLC Charger with Δ - Δ Winding Configuration," IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6

Authors



Hyun-Jin Jin received the B.S degrees from the Department of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea in 2023. She is currently pursuing a M.S. degree in the Power Electronics Laboratory at Jeju National

University. Her research interests include modeling and control of power converters.



Jihun So received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering, in 2021 and 2023, respectively, from Jeju National University, Jeju-do, South Korea, where he is currently working toward the Ph.D. degree in electrical

engineering. His research interests include advanced control of dc/dc converters, power factor correction converters, inverter-based resources, and multi-terminal dc grids.



Yoo-Seop Kim received the B.S. and M.S. degrees from the Department of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea, in 2022 and 2025, respectively. He is currently pursuing a Ph.D. in the Power

Electronics Laboratory at Jeju National University. His research interests include high-frequency power conversion, digital control for switch-mode power supply and resonant converters.



Yeong-Jun Choi received the B.S. and Ph.D. degrees from the Department of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea, in 2013 and 2019, respectively. From 2018 to 2020,

he was a Senior Researcher with the KEPCO Research Institute, South Korea. Since 2020, he has been with Jeju National University, Jeju-do, South Korea, where he is currently an Associate Professor with the Department of Electrical Engineering. His research interests include modeling and control of power conversion circuits including resonant converters, power factor correction converters, wireless power transfer.