

# 높은 정확도 및 낮은 연산량을 위한 TDA 및 대표모델 기반의 LLC 컨버터 다목적 최적 설계

박수성, 양선호, 김래영  
한양대학교 에너지전력전자연구소

## Multi-Objective Optimal Design for LLC Converter Based on TDA and Surrogate Model for High Accuracy and Low Computational Burden

Su-Seong Park, Seon-Ho Yang, Rae-Young Kim  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 높은 정확도 및 낮은 연산량을 달성할 수 있는 다목적 최적화 알고리즘 기반 LLC 공진형 컨버터의 종합 설계 기법을 제안한다. 설계 문제 정식화, 해석 절차 정립 및 다목적 최적화 알고리즘을 기반으로 LLC 공진형 컨버터의 최적 설계를 수행한다. 특히 정확하고 낮은 연산량 달성을 위해서는 LLC 컨버터의 전압 및 전류를 시간 영역 기반으로 해석하는 TDA(Time Domain Analysis) 기법 및 구성하는 자성체의 손실 및 온도를 해석하는 인공지능 기반 대표모델로 해석하는 방법을 적용한다. 이후 다목적 최적화 알고리즘을 적용하여 정확한 신속한 최적 설계를 수행한다. 본 제안하는 기법의 유효성 검증을 위해 1kW급 LLC 컨버터 하드웨어 프로토타입을 사용하여 높은 정확도 및 낮은 연산량 기반 최적설계를 달성함을 확인하였다.

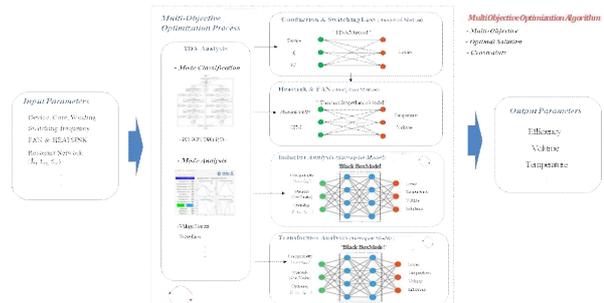
### 1. 서론

신재생 에너지 보급이 확대되고 및 4차 산업혁명 진입에 따른 전력 변환시스템의 요구에 따라 고효율 고밀도 전력변환장치의 수요가 증가하고 있다. 고효율 고밀도 전력변환장치중 대표적인 토폴로지 중 하나인 LLC 공진형 컨버터는 고주파수 동작을 통해 고밀도를 달성할 수 있으며 소프트 스위칭을 기반으로 고효율을 달성할 수 있다 [1]. 이러한 LLC 공진형 컨버터의 설계의 경우 1, 2차 측 스위치 및 다이오드의 소자 종류부터 공진 컵, 공진 인덕터, 공진 커패시터로 구성되는 공진 네트워크 설계까지 다양한 설계 변수를 고려해야 하며 동시에 컨버터 입, 출력 전압 및 전류, 효율, 전력밀도까지 만족해야 하는 복잡한 설계 절차가 요구된다. 이러한 수요에 따라 고효율 및 고밀도를 달성할 수 있는 LLC 공진형 컨버터의 효과적인 최적 설계가 필요하며 관련 다양한 연구가 진행되고 있다.

참고논문[2]은 최적화 알고리즘 및 시간 기반의 해석기법을 이용하여 LLC 공진형 컨버터의 단일 목적 최적 설계기법을 제안하였다. 해당 논문은 최적 설계를 효율이라는 단일목적함수에만 제한하였으며 공진 네트워크 설계 관점에서만 LLC 공진형 컨버터의 최적 설계를 진행하고 자성체 설계 관점에 대해서는 고려하지 않은 한계점을 가진다. 참고논문 [3]은 인공지능 기반 대표모델을 통해 고효율 및 높은 전력 밀도를 달성하는 인버터 다목적 최적 설계기법을 제안한다. 하지만 고려하는 입, 출력 변수가 제한적이고 자성체 설계 변수 역시 고려하지 않은 한계가 있다. 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 종합 다목적 최적 설계를 위한 구조 및 방법론을 제시한다. 본 기법은 LLC 공진형 컨버터의 공진네트워크뿐만 아니라 스위치, 방열판, 그리고 변압기와 인덕터 같은 자성체 설계 변수를 모두 고려하는 종합설계를 진행한다. 해당 기법은 설계 문제의 정식화,

해석 절차의 정립, 다목적 최적 알고리즘 적용 순서로 최적 설계를 진행한다. 최적설계 내 사용하는 해석모델은 높은 정확도 및 낮은 연산량을 달성할 수 있는 시간 기반의 TDA 분석기법과 자성체를 비교적 정확하고 낮은 연산량으로 해석할 수 있는 인공지능 기반 대표모델을 이용한다. 제안하는 기법의 유효성을 검증하기 위해 다른 기존 해석 방법 대비 정확도 및 연산시간을 비교하며 제안한 최적 설계 기반 도출된 결과값과 실제 하드웨어 시제품과의 비교 검증을 통해 본 제안하는 기법의 우수성을 검증한다.

### 2. 제안하는 다목적 최적 설계기법



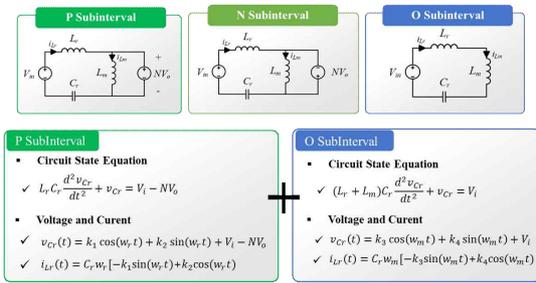
[그림 1] 제안하는 다목적 최적 설계 구조

그림 1은 LLC 컨버터의 종합 다목적 최적 설계를 위해 제안하는 기법의 구조이다. 총 세 단계로 구성되어 있으며, 설계 문제 정식화, 해석 절차 정립, 다목적 최적화 알고리즘 적용 순서로 최적 설계를 진행한다.

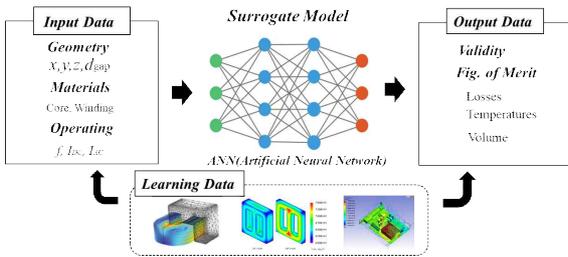
#### 2.1 다목적 최적 설계를 위한 설계 문제 정식화

설계 문제 정식화 단계는 설계 변수, 제약 조건 및 목적함수 등을 선정하는 단계이다. 설계 변수는 스위치, 다이오드, 히트싱크, 팬, 자성체 설계 변수 (코어 종류, 크기, 재료 등) 및 공진 네트워크(커패시터, 인덕터)가 포함된다. 이때 설계 변수에 관련 데이터를 데이터베이스화하여 이용하며 해당 데이터베이스에는 실제 상용품 기반 다양한 시제품의 정보를 포함하여 이용한다. 제약 조건은 설계 변수의 종류와 컨버터의 동작 중 만족해야 하는 온도, 부피, 공진형 컨버터의 ZVS(Zero Voltage Switching) 조건 등과 같은 설계 내 필수적으로 만족해야 하는 조건 등을 포함한다. 목적함수 선정은 설계자의 선택에 따라 효율, 전력 밀도, 온도 등 다양한 성능지수가 목적함수로 될 수 있다.

#### 2.2 다목적 최적 설계를 위한 해석모델



[그림 2] LLC 공진형 컨버터 TDA 기반 해석기법



[그림 3] 대표모델 기반 자성체 해석모델

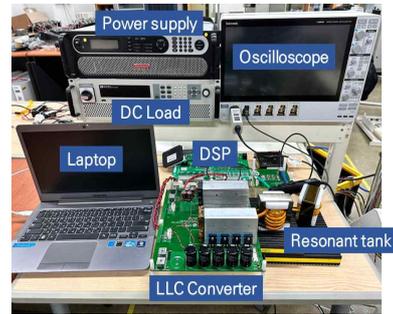
시간 영역 분석(TDA) 기법은 공진형 컨버터를 해석할 때, 시간에 따른 비선형 방정식을 기반으로 컨버터의 전압 및 전류를 분석하는 방법이다[4]. 그림2와 같이 공진형 컨버터의 동작 모드를 P, N, O 등가회로로 분류하며, 각 동작모드에 따른 비선형 방정식 풀이를 통해 정확한 전류 및 전압 크기 값을 도출할 수 있고 이를 기반으로 정밀한 손실 추정이 가능하다. 그림 3은 자성체 해석 진행 시 인공 신경망(ANN) 기반 대표모델을 통해 정확하게 자기 손실 및 온도를 추정 할 수 있는 방법을 나타낸다. 해당 대표모델을 만들기 위해서는 코어의 형상, 재질, 동작 조건 등의 입력 데이터와 그에 따른 손실, 온도, 부피와 같은 출력 데이터를 학습시켜 입, 출력 파라미터의 비선형 관계를 나타낼 수 있는 대표모델을 생성한다. 해당 기법은 기존 수학적 모델링 기법 대비 정확도가 높으며 FEM과 같은 자기 해석 시뮬레이션 툴 대비 계산 시간을 줄일 수 있는 효과적인 방법이다 [5].

### 2.3 다목적 최적 설계를 위한 최적화 알고리즘

구축한 해석모델을 기반으로 최적 설계점을 도출하기 위해 다목적 최적화 알고리즘을 적용하며 대표적인 다목적 최적화 알고리즘 중 하나인 MOGA(Multi Objective Genetic Algorithm)를 사용한다. MOGA 알고리즘은 다목적 최적화 문제에서 효과적으로 최적해를 도출할 수 있는 알고리즘이며 해당 알고리즘을 통해 두 개 이상의 상충관계(trade-off)의 목적함수에서의 최적해 집단을(Pareto Set) 도출하는 방법이다.

## 3. 검증 및 분석

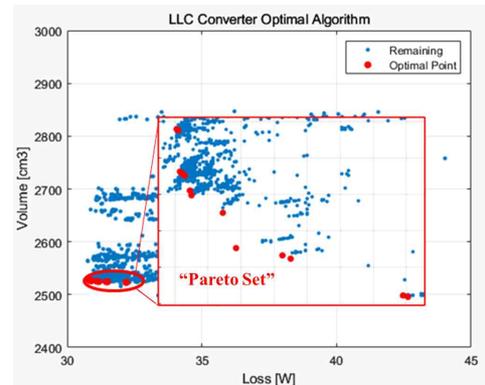
제한한 최적 설계기법의 유효성을 검증하기 위해 그림 4와 같이 실험 환경을 구성하였다. 1[kW]급 LLC 컨버터 프로토타입을 제작하였으며 다양한 설계 변수를 기반으로 실험할 수 있도록 스위치, 다이오드 및 공진 네트워크의 탈, 부착이 비교적 편리하게 실험환경을 구성하였다. 최적설계 검증을 위한 설계변수 범위는 표1과 같이 나타내었다.



[그림 4] 검증을 위한 LLC 공진형 컨버터 실험 환경

| Range of Design Parameters  |                           | Limits of Design Parameters                         |                            |
|-----------------------------|---------------------------|---|----------------------------|
| Resonant Frequency          | $100 < f_r < 500$ [kHz]   | Core Type   | 1-4 [Type]                 |
| Resonant Inductance         | $1 < L_r < 50$ [ $\mu$ H] | Core Material                                       | 1-3 [Type]                 |
| Magnets Frequency           | $1 < f_m < 150$ [kHz]     | Core Number   | 1-2 [Turns]                |
| Switch & Diode              | 1-4 [Type]                | Primary & Secular Wire                              | 1-4 [Type]                 |
| Switch & Diode HeatSink     | 1-4 [Type]                | Assembly length                                     | $0.05 < L_s < 0.2$ [cm]    |
| Switch & Diode EAS          | 1-4 [Type]                |   |                            |
| Switch & Diode CFM          | $1 < CFM < 30$ [l/s/min]  |   |                            |
|                             |                           |   |                            |
| Design Constraint           |                           | Design Constraint                                   |                            |
| Switch HeatSink Temperature | Tem < 50 [°C]             | Switching Frequency                                 | $f_s < 700$ [kHz]          |
| Switch HeatSink Vol         | Vol < 1000 [cm³]          | Magnetic Flux Density                               | $B_{max} < 0.25$ [T]       |
| Switch LFM                  | LFM < 1000 [LFM]          | Current Density                                     | $J_{max} < 200$ [A/mm²]    |
| Diode HeatSink Temperature  | Tem < 50 [°C]             | Magnetic Inductance Error                           | $\Delta L_m \leq 0.4$ [mH] |
| Diode HeatSink Vol          | Vol < 1000 [cm³]          | Winding Utilization                                 | $k_u < 0.85$               |
| Diode LFM                   | LFM < 1000 [LFM]          | Temperature   | Temp < 85 [°C]             |
|                             |                           | Voltage Gain Margin ( $= \frac{V_{max}}{V_{Min}}$ ) | $1.05 < Gain < 1.5$        |
|                             |                           | Inductance Ratio ( $= \frac{L_m}{L_r}$ )            | $1 < K < 10$               |
|                             |                           |   |                            |
| Design Objective Function   |                           |   |                            |
| Efficiency [%]              |                           | Volume [cm³]  |                            |

[표 1] 검증을 위한 설계 파라미터 범위



[그림 6] 제한하는 최적 설계 결과 값

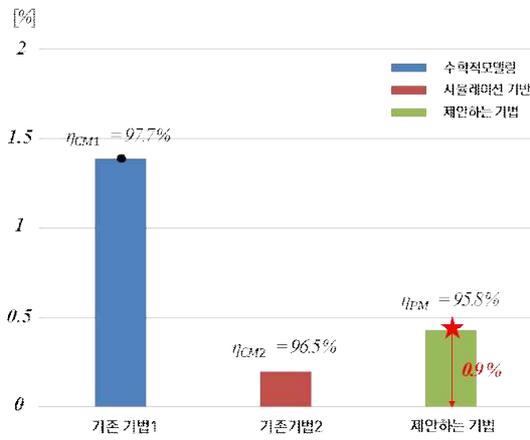
|     | 설계 변수      | 결과값           |
|-----|------------|---------------|
| 컨버터 | 공진 주파수     | 299.6 [kHz]   |
|     | 스위치        | TP65H015G5WS  |
|     | 다이오드       | scs230ae2hr-e |
|     | 스위치 축 방열판  | 510-3M        |
|     | 다이오드 축 방열판 | 510-3M        |
| 변압기 | 코어         | EE 6565       |
|     | 1차측 권선     | 0.1/500       |
|     | 2차측 권선     | 0.1/1500      |
|     | 코어 물질      | PM12          |
|     | 공극         | 0.1076 [cm]   |
| 인덕터 | 코어 병렬 수    | 1 [개]         |
|     | 1차측 권선 턴수  | 9 [Turns]     |
|     | 코어         | EE 6565       |
|     | 1차측 권선     | 0.1/500       |
|     | 물질         | PM12          |
| 인덕터 | 공극         | 0.1426 [cm]   |
|     | 코어 병렬 수    | 1 [개]         |
|     | 1차측 권선 턴수  | 7 [Turns]     |

[표 2] 최적 설계를 위한 설계 파라미터

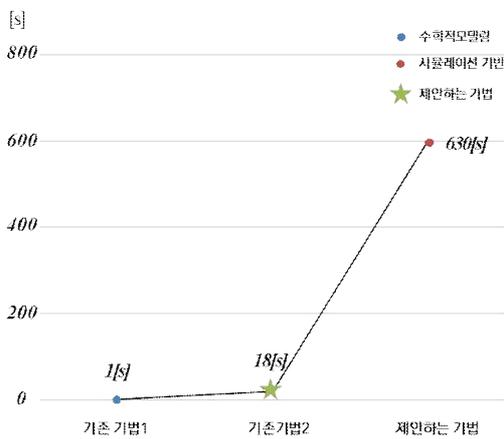
#### 4. 결론

본 논문은 LLC 공진 컨버터의 다목적 최적 설계를 위한 기법을 제시한다. 제안된 기법은 설계 문제 정식화, 해석모델 구축, 다목적 최적화 알고리즘 적용으로 구성된다. 제안한 모델의 정확성은 실제 하드웨어 프로토타입 기반 실험 결과로 검증되었으며 기존 방법과 정확도 추정 및 연산량을 비교하였다. 제안하는 기법은 비교적 높은 정확도 및 낮은 연산량으로 최적 설계 점을 도출하였고 해당 최적 설계점은 실제 하드웨어 실측 값과 값 추정에 있어 0.9% 차이로 큰 오차를 보이지 않으며, 걸리는 연산량은 기존 최적 설계기법 대비 현저히 감소함을 알 수 있다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(2012020800020, 통합형 최적 설계 플랫폼 기반 초고효율 전력 변환시스템 개발)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구되었음(No. 2018201010650A)



[그림 7] 제안하는 기법의 효율 추정 성능



[그림 8] 제안하는 기법의 연산량

제안한 최적 설계기법을 통해 도출된 결과 값은 그림 6과 같다. MOGA 기법을 이용하여 10,000번 정도 반복 알고리즘 적용을 진행하였으며 목적함수는 손실과 부피로 선정하여 가중치에 따른 파레토 집단을 그림과 같이 표현하였다. 이때 해당 최적 설계점 중 하나의 설계점에 대한 상세 파라미터를 표 2와 같이 정리하였다. 해당 표에는 공진형 컨버터의 공진 주파수, 스위치 및 다이오드의 종류, 사용한 방열판의 종류, 변압기 및 인덕터의 설계 턴 수 및 코어 종류 등을 표기하였고 이를 기반으로 실제 하드웨어 프로토타입을 제작하였다.

제안한 기법의 신뢰성을 검증하기 위해 최적 설계에서 추정된 결과 값과 하드웨어 실험 기반의 실측값을 비교하고 기존 최적 설계기법과의 정확도 및 연산량의 차이를 비교하였다. 비교대상인 기존 기법의 경우 첫 번째는 수학적 모델링 기반의 최적 설계기법이며 두 번째는 회로 및 자기 해석 시뮬레이션 기반의 최적 설계기법이다. 그림 7은 본 기법의 추정 정확도를 나타낸 그래프로, 제안하는 기법의 효율 추정 오류는 약 0.9%로, 비교적 정확하게 효율을 추정함을 알 수 있다. 그림 8은 제안하는 기법의 연산량을 나타낸 그림으로 수학적 모델링에 비해서는 연산량이 크지만, 회로 및 자기 해석 시뮬레이션 기반 최적 설계기법보다는 상당히 낮은 연산량을 지님을 알 수 있다. 결론적으로 제안하는 기법은 비교적 정확한 효율 추정이 가능하고 연산 부담량도 크지 않아 LLC 공진형 컨버터 다목적 최적 설계에 적합한 기법임을 알 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] X. Fang et al., "Efficiency-Oriented Optimal Design of the LLC Resonant Converter Based on Peak Gain Placement," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 5, pp. 2285-2296, May
- [2] Y. Wei, T. Pereira, Y. Pan, M. Liserre, F. Blaabjerg and H. A. Mantooth, "A General and Automatic RMS Current Oriented Optimal Design Tool for LLC Resonant Converters," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 6, pp. 7318-7332, Dec. 2022
- [3] R. Rajamony, S. Wang, G. Calderon-Lopez, I. Ludtke and W. Ming, "Artificial Neural Networks-Based Multi-Objective Design Methodology for Wide-Bandgap Power Electronics Converters," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 3, pp. 599-610, 2022
- [4] S. -S. Park, M. -H. Eom, S. -T. Lee and R. -Y. Kim. 2023. "Accurate Analysis Method and Voltage Gain Curve Derivation Algorithm Based on Time-Domain Analysis for High-Efficiency LLC Resonant Converter Design" Electronics 12, no.9
- [5] T.Guillod, P.Papamanolis and J. W. Kolar, "Artificial Neural Network (ANN) Based Fast and Accurate Inductor Modeling and Design," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 1, pp. 284-299, 2020