

# AI-Aided Design Optimization 기술을 이용한 UPS 인버터시스템의 다분야통합최적설계

최동훈\* · 문형주\*\* · 이동주\*\*\* · 박상민\*\*\*\*

\*㈜피도텍 대표, \*\*㈜피도텍 응용연구팀, \*\*\*㈜국제통신공업, \*\*\*\*한국전자기술연구원

## Multidisciplinary Design Optimization of a UPS Inverter System Using the AI-Aided Design Optimization Technology

Dong-Hoon Choi, HyeongJoo Moon, DongJoo Lee, Sangmin Park

\*CEO, PIDOTECH Inc., \*\* Applied Research & Development Team, PIDOTECH Inc.,

\*\*\*KUKJE ELETRIC MFG. Co., \*\*\*\*KETI

### ABSTRACT

전세계적으로 환경 보호 및 에너지 절감이 중요한 이슈로 대두되고 있으며, 다양한 산업 분야에서 에너지 효율성을 개선하는 기술적 노력이 진행되고 있다. UPS 인버터 시스템의 입력전압 및 스위칭 주파수와 같은 회로 설계변수와 방열판의 형상변수는 출력 전압 THD 및 소자 내부 온도 그리고 시스템의 에너지 효율과 같은 회로 성능을 결정짓는 중요한 인자이므로, 작동 조건에서 성능에 대한 구속조건들을 만족하며 효율을 극대화할 수 있는 회로 설계변수와 방열판 형상변수 값들을 최적으로 결정하는 다분야통합최적설계의 도입이 필요하다.

그러나, 다분야통합최적설계를 포함한 최적설계 비전문가인 전력전자 전문가들이 회로 해석 모델과 열 해석 모델을 활용하여 최적설계를 수행하고 그 결과로부터 설계 인사이트를 얻는 데에는 두 가지 큰 걸림돌이 존재한다. 첫번째는 상용 시뮬레이션 툴을 활용한 전자기 회로 해석과 방열판 열 해석을 이용하는 최적설계를 위해서는 효과적이고 적합한 최적설계 전략이 수반되어야 한다는 것이다. 두번째는 최적설계 과정에서 생성된 많은 데이터로부터 최적설계 결과의 이해는 물론 기여도 분석, 상충성 분석, 민감도 분석을 통하여 설계 인사이트를 얻기 위해서는 전문적인 데이터 분석 지식이 필요하다는 점이다.

이러한 두 가지 큰 걸림돌을 제거하여 최적설계 및 데이터 분석에 대한 전문지식이 부족한 설계 엔지니어도 쉽게 사용하도록 하기 위하여 최근 개발된 기술이 AI-Aided Design Optimization (AADO) 기술이다. 이 연구에서는 AADO 기술을 구현한 소프트웨어인 AIDesigner sim을 사용하여 UPS 인버터 시스템의 다분야통합최적설계를 수행하였다. 그 결과, 모든 성능에 대한 구속조건들을 효율을 극대화한 회로 설계변수와 방열판 형상변수 값들을 최적으로 결정할 수 있었다.

### 1. 서 론

전세계적으로 환경 보호 및 에너지 절감이 중요한 이슈로 대두되고 있으며, 다양한 산업 분야에서 에너지 효율성을 개선하는 기술적 노력이 진행되고 있다. UPS 인버터 시스템의 회로 설계변수와 방열판의 형상변수는 인버터 시스템의 회로 성능을 결정짓는 중요한 인자이므로 성능에 대한 구속조건들을 만족하며 에너지 밀도를 극대화할 수 있는 회로 설계변수와 방열판 형상변수의 최적 값을 도출할 수 있는 다분야통합

최적설계의 도입이 필요하다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구에서는 인버터 시스템의 설계변수와 성능지수를 규정하는 설계문제 정식화를 정립하고, 다분야통합최적설계 기법과 연계할 수 있도록 해석 절차를 정립했다.

또한, AI-Aided Design Optimization (AADO) 기술을 적용하여 최적설계에 대한 전문지식이 많지 않은 산업체 설계자도 손쉽게 신뢰할 수 있는 최적해를 얻을 수 있으며, 최적설계를 진행하면서 발생한 데이터를 이용하여 산업체 설계자가 설계 통찰력을 얻을 수 있는 설계 결과 보고서를 제공받을 수 있도록 하였다.

### 2. 설계문제 정식화

#### 2.1 설계 대상 입출력 변수

그림 1과 같은 500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템에서 최적화 대상인 성능 지수는 출력 전압 THD [%], 리액터 온도 [°C], SiC 소자 Case 온도 [°C], 시스템 효율 [%], 방열판 무게 [g]로 총 5개이다.

이러한 성능 지수에 영향을 주며 변경 가능한 설계변수는 DC 전압, 스위칭 주파수, 출력 필터 리액터 리액턴스 값과 인덕턴스 값의 회로 설계변수 4개와 그림 2의 방열판 형상을 나타내는 설계변수인  $W, H, H_f, b, t_f$ 의 5개이다.

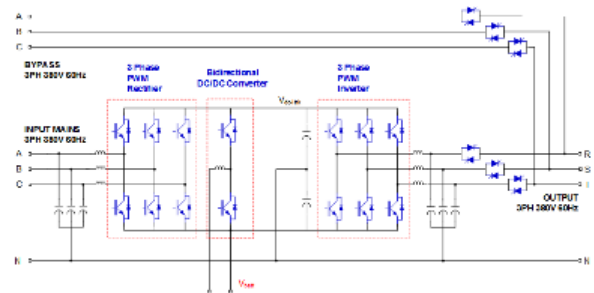


그림 1 500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템  
Fig. 1 Inverter system for a 500 kW SiC UPS

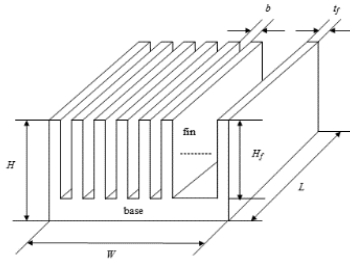


그림 2 방열판 형상  
Fig. 2 Heatsink geometry

## 2.2 설계문제 정식화

앞서 기술한 500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터시스템의 설계문제 정식화는 아래와 같다.

목적함수는 인버터 시스템의 에너지 밀도 및 단가를 결정하는 성능 지수인 방열 판의 부피를 최소화하도록 정의했다.

구속조건은 시스템 효율과 출력전압 THD, 그리고 리액터 및 SiC 소자 Case 온도로 정의했다. 시스템 효율은 인버터 시스템의 목표 효율을 초과하도록 정의했으며, 출력전압 THD와 리액터 및 SiC 소자 Case 온도는 동일 출력 UPS 인버터시스템 제품의 허용 최대 온도 값에 안전 계수를 적용한 값 이하를 유지하도록 정의했다.

설계 변수는 앞서 2.1 장에 기술한 회로 설계변수 4개와 방열판 형상 변수 5개로 총 9개를 선정하였다.

## 3. 해석절차 정립

주어진 설계변수 값에 상응하는 인버터 시스템 성능지수 값을 계산하기 위한 해석절차를 그림 3에 도시하였다. 이 그림은 인버터 시뮬레이션 프로그램 PSIM과 열 해석 프로그램 Icepak, 그리고 리액터 해석 수식 모델을 활용하여 설계변수 값에 상응하는 구속조건과 목적함수 값을 산출하는 절차를 보여준다. 그런데 PSIM의 출력변수 중 하나인 “SiC 소자 손실”은 Icepak의 입력변수이고, Icepak의 출력변수 중 하나인 “SiC 소자 junction 온도”는 PSIM의 입력변수인 다분야통합 해석 문제이다. 본 연구에서는 반복 해석을 통해 SiC 소자 손실 값과 junction 온도를 수렴시키는 방식을 적용하여 해석기간 결합 매개변수(coupled variables)를 고려한 다분야통합 최적설계를 수행할 수 있는 해석 절차를 정립했다.

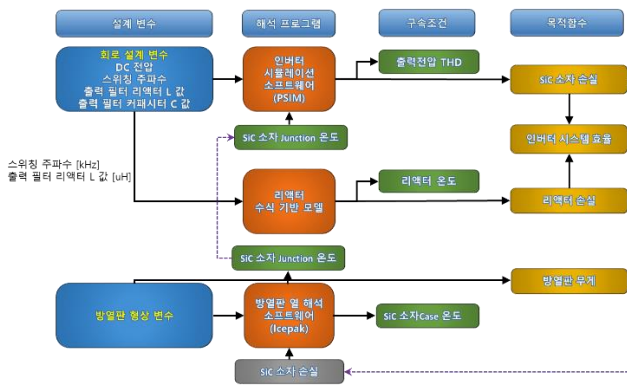


그림 3 500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템 해석절차  
Fig. 3 500 kW SiC UPS inverter system simulation process

## 4. AADO 기술을 이용한 최적설계

### 4.1 AADO 기술

AADO 기술은 산업체에서 공학설계 과정으로 많이 활용되는 스크리닝 (screening), 메타모델링 (metamodeling), 최적화 (optimization), 데이터 분석 (data analysis)의 4개 과정을 하나의 프로세스로 캡슐화한 기술이다. [3]

AADO 기술의 첫 번째 단계는 well-balanced screening 모델이다. 기존 스크리닝 기법의 주요 설계변수 선정 방식은 각 성능지수 별로 선정되므로 모든 성능지수 입장에서는 불균형하게 선정되는 경우가 있는데, well-balanced screening 모델은 모든 성능들을 균형 있게 (balanced) 고려하여 주요 설계변수를 선정한다.

두 번째 단계는 자율 메타모델 생성 (autonomous metamodeling) 모델로, 주요 설계변수의 함수로 각 성능지수를 예측할 수 있는 메타모델을 생성하기 위해 데이터 획득부터 메타모델 생성에 이르는 전 과정을 자율적으로 진행하는 모델이다. 순차적 샘플링 기법을 이용하여 정확한 메타모델 생성을 위한 최소의 데이터를 획득하며, 획득한 데이터에 가장 적합한 메타모델을 생성한다.

세 번째 단계는 룰-기반 최적화 기법 선정 (Rule-based optimizer) 모델로, 주어진 설계문제에 적합한 최적화 기법을 자동으로 선정하여 최적화를 수행한다.

마지막 단계는 DAVIS (Data Analysis, Visualization, and Interactive Storytelling) 모델이다. DAVIS 모델은 AADO 절차를 수행하던 중 획득한 데이터와 자율적으로 획득한 추가 데이터를 분석하여 설계자가 통찰력을 얻을 수 있도록 데이터 스토리텔링 (Data storytelling) 방식으로 결과 보고서를 자동으로 생성한다.

### 4.2 AADO 기술을 이용한 인버터 시스템 최적설계

500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템에 대한 다분야통합 최적설계를 수행하기 위하여 AADO 기술을 이용하였다. 이에 대한 다분야통합최적설계 결과를 분석한 결과를 기술한다. 3장에 기술한 해석 절차와 AADO 기술의 첫 번째 단계인 well-balanced screening 모델을 연동하여 9개의 설계변수 중에서 모든 성능지수들에 균형 있게 영향을 미치는 7개의 주요 설계변수를 선정하였다.

주요 설계변수로 선정된 7개 변수의 함수로 자율 메타모델 생성 (autonomous metamodeling) 모델을 이용하여 목적함수와 구속조건에 대한 5개의 메타모델을 자율 생성하였으며, 생성한 메타모델의 정확도는 평균 98.7%로 실제 해석 모델과 매우 유사한 예측 결과 값을 산출하는 것을 확인했다.

생성된 메타모델을 기반으로 최적설계를 수행한 결과, 인버터 시스템 구속 조건을 모두 만족하면서 방열판 무게를 7.2% 감소시키는 우수한 결과를 도출하였다.

마지막으로 DAVIS 모델이 최적설계를 수행하면서 획득한 데이터와 자율적으로 획득한 추가 데이터를 분석하여 결과보고서를 제공했다. 이 DAVIS 보고서를 통하여 최적화 결과 요약과 함께 구속조건의 위배 여부를 확인할 수 있었다. 또한, 목적함수 개선을 위한 설계변수의 기여도, 성능지수 간의 상충성 분석, 전역 민감도 해석을 제공함으로써, 500 kW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템 설계에 대한 통찰력을 제공하였다.

## 4. 결론

500 KW급 SiC 기반 UPS 인버터 시스템의 설계문제를 2절에 정식화하였다. 이 문제는 회로 해석과 열 해석을 동시에 고려하여 설계해야 하는 다분야통합최적설계 문제이다. 주어진 설계변수 값에 상응하는 성능지수 값을 산출하는 해석절차를 3절에 기술하였다. 그림 3에서 명확히 볼 수 있는 바와 같이, 인버터 시뮬레이션 프로그램 PSIM과 열 해석 프로그램 Icepak의 입출력 변수가 연계되어 있는 다분야통합 해석절차이다. 2절에 정의한 4개의 구속조건을 만족하면서 목적함수인 방열판의 부피를 최소화하는 다분야통합최적설계 결과를 얻기 위하여 3절에 기술한 해석절차를 연계한 후, 4-1절에 간략히 소개한 AADO 기술을 활용하였다.

AADO 기술을 활용한 최적설계를 수행한 결과 4개의 구속조건을 모두 만족하면서 방열판 부피가 기존 대비 7.2% 향상된 최적 해를 성공적으로 얻었으며, 설계자가 인사이트를 얻을 수 있는 DAVIS 보고서를 자동 제공하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20212020800020)

## 참 고 문 헌

- [1] Lee, G. B., Choi, B. L., Choi, D. H., Nam, C. H., and Kim, G. H., 2011, "Approximate Multidisciplinary Design Optimization for subframe Component of Vehicle Front Suspension," KSAE Annual Conference Proceedings, pp. 1010-1012.
- [2] Rho, K. W., Jang, W. J., Kim, J. H., and Kim, G. W., 2021, "Structural Design Optimization of the vehicle Frame Body Section," KSAE Annual Conference Proceedings, pp. 64-66.
- [3] PIDOTECH, 2023, AIDesigner Manual, PIDOTECH Inc.