ISSN 1975-8359 [Print] / ISSN 2287-4364 [Online]
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 74, no. 4, pp. 586~593, 2025
https://doi.org/10.5370/KIEE.2025.74.4.586

Multidisciplinary Design Optimization of a UPS Rectifier Using the AI-Aided Design Optimization Technology

AI-Aided Design Optimization 기술을 이용한 UPS 정류기의 다분야통합최적설계

Dong-Hoon Choi . Dong-Ju Lee
최동훈† . 이동주†

Abstract

A multidisciplinary design optimization (MDO) was performed for a rectifier, which is one of key components of uninterruptible power supplies (UPS), using AI-Aided Design Optimization (AADO) technology. First, the design variables and performance indices of the target rectifier were clearly defined to formulate a MDO problem. Then, a multidisciplinary analysis procedure was established using commercial simulation software. Through AADO technology, optimal circuit design variables and heatsink shape parameters were successfully determined, achieving a 36.1% reduction in heatsink volume while satisfying various constraints on circuit performance and temperature.

Key Words

Multidisciplinary Design Optimization, Artificial Intelligence, Uninterruptible Power Supply, Rectifier

1. 서 론

전세계적으로 환경 보호 및 에너지 절감이 중요한 이슈로 대두되고 있으며, 다양한 산업 분야에서 에너지 효율 및 에너지 밀도를 개선하는 기술적 노력이 진행되고 있다. 무정전 전원 장치 (Uninterruptible Power Supply; UPS) 정류기의 경우에도 이러한 기술적 발전이 진행되어 왔다. 그런데 UPS 정류기의 최적설계에 대한 기존 연구는 많지 않다. J. W. Kolar 등[1]은 power factor correction (PFC) 부스트 정류기의 효율과 전력 밀도를 동시에 최적화하는 다중목적함수 최적설계를 수행하여, 다양한 Pareto 해들을 구했다. E. O. Prado 등[2]은 UPS 인버터의 비용과 효율을 동시에 최적화하는 다중목적함수 최적설계를 수행하였다. 그들은 47개의 파워 MOSFET 데이터베이스를 사용하여 다양한 변조 기술에서 비용과 효율의 최적 균형을 찾는 Pareto 해들을 구했다. X. Li 등[3]은 UPS 내의 삼상 인버터의 제어 성능을 향상시키고 출력 전압의 품질을 최적화하기 위하여, 삼상 공간 벡터 펄스 폭 변조 (SVPWM) 기술을 이중 폐루프 제어 시스템과 결합하여 인버터의 전압 파형을 개선하였으며 particle swarm optimization (PSO) 알고리즘이라는 전역 최적화 기법을 사용하여 이중 폐루프의 PI 제어 매개변수를 최적화하여 시스템의 동적 성능을 개선하고 안정화 시간 및 오버슈트를 줄이는 방법을 사용하였다. 비교적 최근에 발표된 UPS 제어 최적화에 대한 논문으로, 필터의 열화와 그에 따른 UPS 성능 저하 문제를 해결하기 위하여 실시간으로 필터 매개변수를 추정하고 이를 모델 예측 제어 시스템에 반영하여 UPS 성능을 최적화하는 연구[4]가 있었다. 또한 단상 UPS 인버터의 제어 성능을 최적화하기 위한 새로운 방법으로, 옵셋 오류를 제거하기 위한 적분 제어와 인버터 시스템의 폐루프 안정성을 보장하기 위한 상태 피드백 제어 그리고 디지털 전역통과 필터를 사용하는 연구 결과[5]도 발표되었다. 이러한 기존 연구들은 UPS 정류기 또는 인버터의 효율을 포함한 회로 성능과 기기 내부 온도 성능을 동시에 고려하지는 않았다.

그런데 UPS 정류기의 출력 직류전압 및 스위칭 주파수와 같은 회로 설계변수와 방열판의 형상변수는 입력 전류 THD, 입력 역률, 효율과 같은 회로 성능과 소자 내부 온도들을 결정짓는 중요한 인자이므로 성능에 대한 구속조건들을 만족하며 에너지 밀도를 극대화할 수 있는 회로 설계변수와 방열판 형상변수의 최적 값을 도출할 수 있는 다분야통합최적설계의 도입이 필요하다. D. Lee 등[6]은 이 논문과 같은 500 kW급 SiC 기반 UPS의 입력 및 출력 필터 설계와 파워 스택의 방열판 설계를 동시에 고려하는 다분야통합설계를 수행하였다. 그러나 다분야통합설계를 수동적인 시행착오법을 사용하여 수행하였고, 방열판에서의 열 방출을 예측하기 위하여 1-D 모델인

† Corresponding Author 1 : PIDOTECH Inc., Republic of Korea.
E-mail : dhchoi@pidotech.com https://www.pidotech.com
† Corresponding Author 2 : KUKJE Electric Mfg. Co., Ltd. Republic of Korea.
E-mail : david@kjups.com https://orcid.org/0000-0002-8728-3132
Received : Sep. 12, 2024 **Revised** : Feb. 14, 2025 **Accepted** : Feb. 21, 2025

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

열 등가 회로 모델을 사용하는 한계를 보였다.

본 연구에서는 UPS 정류기의 설계변수와 성능지수를 정의하는 설계문제 정식화를 수립하였다. 또한 설계변수 값이 주어지면, 여러 회로 성능지수 값을 산출하는 회로 해석 프로세스와 다양한 온도 값을 산출하는 열 해석 프로세스를 연계하는 다분야통합해석 절차를 정립하였다. 그리고 최적설계에 대한 전문지식이 많지 않은 설계자라도 신뢰성 있는 최적 해를 얻을 수 있는 AI-Aided Design Optimization (AADO) 기술[7]을 이용하여, 다양한 회로 성능 및 온도에 대한 구속조건을 동시에 만족하면서 방열판 부피를 최소화하는 회로 설계변수 및 방열판 형상변수를 최적으로 결정하고자 한다.

이 논문의 구성은 아래와 같다. 2절에서 설계문제 정식화를, 그리고 3절에서 다분야통합해석 절차를 기술한다. 4절에서는 AADO 기술을 간략히 설명한 후, 이 기술을 이용한 다분야통합최적설계 결과를 기술한다. 그리고 5절에 이 논문을 요약하며 결론을 제시하였다.

2. 설계 대상 및 설계문제 정식화

2.1 설계 모델

그림 1은 국내 3상 4선식 저압계통에서 널리 적용되고 있으며 운영 효율이 높고 소형, 경량화로 설치 공간을 최소화할 수 있는 무변압기형 UPS의 주요 구성도이다. 무변압기형 UPS는 3상 교류 입력 전압을 일정한 직류 전압으로 변환시키고 입력 역률과 입력 전류의 전고조파함유율(Total Harmonic Distortion; THD)를 제어하는 3상 정류기, 직류 전압을 입력받아 중요 부하에 정전압, 정주파수를 갖는 3상 교류 출력 전압을 공급하기 위한 3상 인버터, 입력 전원이 정상 또는 정전시, 배터리를 충전 또는 방전시키기 위한 DC-DC 컨버터부로 구성되어 있으며 설계 목표 사양은 표 1과 같다.

특히 3상 정류기는 저압계통 전압의 변동에 대한 강인한 특성, 입력 역률 최소화, 입력 전류 THD를 최소화하면서 높은

표 1 UPS 설계 사양

Table 1 Design specification of UPS

항 목		사 양
입력 (정류기)	전압	3상 4선식 380/220 [V] ±10 %
	주파수	60 [Hz] ±5 %
	역률	0.99 이상
	전류 THD	3 [%] 이하
배터리	충전 전압	403 [V]
	정격 전압	360 [V]
	방전 종지전압	306 [V]
출력 (인버터)	전압	3상 4선식 380/220 [V] ±2 %
	주파수	60 [Hz] ±1 %
	출력전압 THD	3 [%] 이하
	출력전압 불평형률	1 [%] 이하
	정격 용량	500 [kW]
시스템	최대 효율	98 [%]
	운용 온도	0 ~ 40 [℃]
	냉각방식	강제 풍냉식

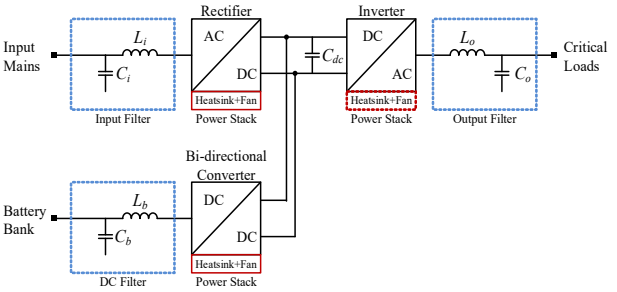

그림 1 무변압기형 UPS의 주요 구성도

Fig. 1 Configuration diagram of transformer-less UPS

효율 특성을 갖아야만 하는 핵심적인 전력변환부이므로 본 논문에서는 3상 정류기를 1차적인 최적 설계 대상으로 선정하였으며 그 최적 설계 방법은 3상 정류기와 전기적 대칭 구조를 갖는 3상 인버터에도 쉽게 적용이 가능하다.

2.2 설계문제 정식화

그림 2는 설계 모델 정류기의 전기회로를 나타낸 것으로써 입력 역률과 입력 전류 THD를 최소화시키기 위한 입력 필터용 커패시터(C_i)와 리액터(L_i), 스위칭 동작을 통한 전력변환을 위한 SiC 소자들과 DC 커패시터(C_{dc})로 구성되어 있다. 그리고 그림 2의 SiC 소자들은 스위칭 동작을 통한 전력변환시 발생하는 도통 손실과 스위칭 손실로 인한 발열을 안정적으로 냉각시키기 위해 그림 3과 같은 방열판 위에 배치되며 별도의

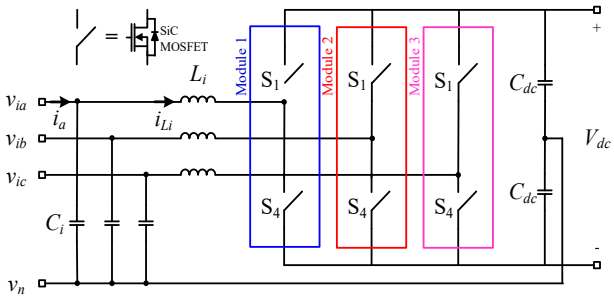

그림 2 정류기 전기 회로

Fig. 2 Electrical circuit of rectifier

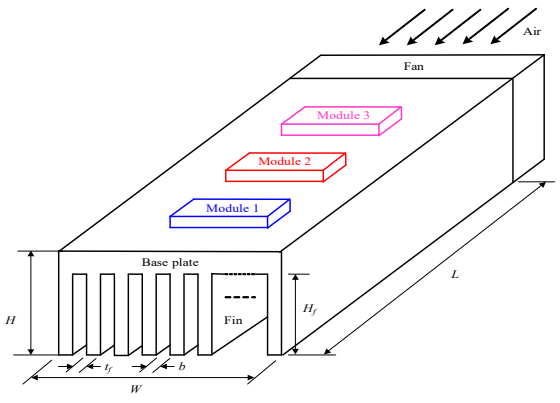

그림 3 정류기 방열 구조

Fig. 3 Heat dissipation structure of rectifier

냉각 팬을 통해서 강제풍냉식의 방열 구조를 갖는다.

일반적으로 UPS 정류기 성능에 크게 영향을 주는 성능 평가 지표로는 입력 전류 THD [%], 입력 역률, 정류기 효율 [%], 리액터 코일 온도 [°C], 리액터 코어 온도 [°C], 4곳의 SiC 소자 케이스 온도 [°C], 방열판 부피 [mm^3] 등이 있다.

목적에 부합되는 최적 설계 결과를 도출하기 위해서는 설계 모델에서 그 성능에 크게 영향을 설계 변수들과 설계 구속조건들을 적절히 도출하고 설계 목적함수를 정의하는 설계문제 정식화 과정이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 표 2에 제시된 바와 같이, 전기 회로 설계변수로 DC 전압, 스위칭 주파수, 입력 필터용 리액터 인덕턴스 값, 입력 필터 용 커패시터의 커패시턴스 값을 선정하였고, 방열 구조에 대한 설계 변수로 방열판의 핀 높이(H_f), 핀 두께(t_f), 핀 간격(b), 베이스 두께, 길이(L)를 선정하여 총 9개의 설계 변수를 정의하였다.

그리고 목적함수로는 정류기의 안정적인 전기적 성능을 유지하면서 전력 밀도[W/L]를 최대화시키기 위해서 방열판의 부피를 최소화하도록 정의하였다. 또한 구속조건으로는 입력 전류 THD, 입력 역률, 정류기 효율, 그리고 리액터 코일 온도, 리액터 코어 온도, 그리고 SiC 소자 케이스 온도에 대한 구속조건을 표 2과 같이 설정하였다. 입력 전류 THD는 상한값 이하여야 하고, 입력 역률과 정류기 효율은 하한값 이상이어야 하며, 리액터 코일 온도, 리액터 코어 온도, 그리고 SiC 소자 케이스 온도는 안정된 동작을 위해서 상한값 이하를 유지하도록 정식화하였다. 그리고 설계변수로는 전기 회로 설계변수 4개와 방열판 구조 설계변수 5개로써 총 9개를 선정하였으며, 표 2과 같이 하한값과 상한값을 지정하였다.

표 2 설계변수, 목적함수 및 구속조건

Table 2 Design variables, objective function, and design constraints

분류	항목명	하한값	상한값
전기 회로 설계 변수	DC 전압 [V]	700	850
	스위칭 주파수 [kHz]	4.8	15
	입력 필터용 리액터 인덕턴스 값 [mH]	0.15	0.52
	입력 필터용 커패시터 커패시턴스 값 [mF]	0.50	0.60
방열 구조 설계 변수	핀 높이 H_f [mm]	60	90
	핀 두께 t_f [mm]	0.5	1.5
	핀 간격 b [mm]	5	7
	베이스 두께 H_b [mm]	10	20
	길이 L [mm]	400	650
목적 함수	부피 최소화	-	-
구속 조건	입력 전류 THD [%]	-	2.5 이하
	입력 역률	0.99 이상	-
	정류기 효율 [%]	98.5 이상	-
	리액터 코일 온도 [°C]	-	100 미만
	리액터 코어 온도 [°C]	-	
	SiC 소자 1 케이스 온도 [°C]	-	80 이하
	SiC 소자 2 케이스 온도 [°C]	-	
	SiC 소자 3 케이스 온도 [°C]	-	
	SiC 소자 4 케이스 온도 [°C]	-	

3. 다분야통합해석 절차 정립

9개 설계변수의 주어진 값에 상응하는 10개 성능지수 값을 산출하기 위한 해석절차를 그림 4에 도시하였다.

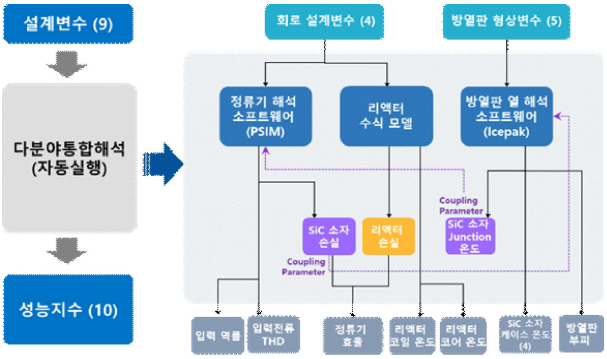

그림 4 다분야통합해석 절차

Fig. 4 Multidisciplinary analysis procedure

이 그림의 왼쪽에 보인 바와 같이, 9개의 설계변수 값이 주어지면 이에 상응하는 10개의 성능지수 값을 산출하는 해석절차가 자동 실행되어야 한다. UPS 정류기 해석절차에서는 회로 해석을 위하여 상용 소프트웨어인 “PSIM”과 리액터 해석을 위한 “수식 모델”을 사용하고, 방열판 열 해석을 위하여 상용 소프트웨어인 “Icepak”을 사용한다. 그림 위쪽에 있는 회로 설계변수 4개와 방열판 형상변수 5개의 값들을 정하면, 즉 하나의 설계안이 주어지면, 해석 프로그램 3개를 이용하여, 아래쪽에 있는 성능지수 10개의 값을 산출한다. 성능지수 중 표 2에 명시한 목적함수 1개와 구속조건 9개에 포함된 성능지수 10개는 맨 아래 회색 박스에 표기하였다. 3개의 해석 프로그램 바로 아래에 표기한 “SiC 소자 손실”, “리액터 손실”, 그리고 “SiC 소자 Junction 온도”는 맨 아래 회색 박스에 표기된 성능지수 값들을 구하기 위하여 중간 변수로 사용되는 것이다. 그림 4의 해석절차를 살펴보면 “Coupling Parameter”가 2개 있다. PSIM의 입력으로 회로 설계변수 4개의 값만 아니라 “SiC 소자 Junction 온도” 값도 주어져야 한다. 그런데 “SiC 소자 Junction 온도” 값은 Icepak을 이용한 열 해석 결과로 산출된다. 또한 Icepak의 입력으로 방열판 형상변수 5개의 값만 아니라 PSIM을 이용하여 산출한 “SiC 소자 손실” 값도 주어져야 한다. 따라서 하나의 설계안이 주어지면, PSIM과 Icepak을 반복적으로 실행시켜 수렴된 성능지수 값들을 얻는 “다분야통합해석”을 수행하여야 한다. 이러한 다분야통합해석 절차가 자동 실행되도록 하기 위하여 상용 Process Integration and Design Optimization (PIDO) 소프트웨어인 PIAnO[8]를 사용하였다.

PSIM의 1회 해석 시간은 2분 정도이나, Icepak의 1회 해석 시간은 약 40분이므로, 한 번의 다분야통합해석 결과를 얻는

데 오랜 시간이 걸린다. 따라서 합리적인 시간 안에 다분야통합최적설계 (Multidisciplinary Design Optimization ; MDO) 결과를 얻으려면, 성능지수의 메타모델을 이용하여 MDO를 수행하여야 한다. 성능지수의 정확한 메타모델을 효율적으로 생성하는 것은 공학설계의 중요한 기술 중의 하나인데, 이 기술은 다음 절에서 소개하는 AADO 기술에 포함되어 있다. UPS 정류기 설계 사례의 경우 성능지수들의 메타모델을 생성한 결과는 다음 절에 기술한다.

4. AADO 기술을 이용한 다분야통합최적설계

4.1 AI-Aided Design Optimization (AADO) 기술

MDO를 포함한 공학설계 절차를 올바로 수행하여 신뢰성 있는 제품설계 결과를 얻으려면, 공학설계에 대한 폭넓은 지식을 습득해야 한다. 그런데 이러한 전문적이며 방대한 지식은 단기간 교육을 통해 얻을 수 없다. 따라서 공학설계에 대한 전문지식이 부족한 산업체 엔지니어도 쉽게 사용하여 신뢰성 있는 최적설계 결과를 얻을 수 있는 최적설계 "대중화 기술"이 꼭 필요하다. 여기서 대중화 (democratization) 기술은 비전문가도 전문가처럼 결과를 도출할 수 있고 그 결과로부터 필요한 인사이트를 얻게 하는 기술로, 현재 데이터 처리 및 분석 분야, AI 모델 생성 분야 등의 다양한 공학 분야를 위한 대중화 기술들이 활발히 개발되고 있다.

이 논문에서 소개하고자 하는 "최적설계 대중화" 기술은 두 가지를 제공하는 기술[9]이다. 첫째, 널리 활용되는 공학설계 best practice 절차를 자율적으로 자동 수행하여 최적설계 결과를 제공한다. 둘째, 획득한 설계결과 데이터를 사용하여 인사이트를 얻을 수 있도록 데이터 스토리텔링 방법을 적용한 최적설계 결과 보고서를 자동 생성하여 제공한다. 이 기술을 개발하기 위하여 AI를 포함한 최신 기술들을 효과적으로 활용하였고, 이 기술을 AADO 기술로 명명하였다. 이 기술은 4개의 핵심 모듈로 구성되어 있다. (1) 주요 설계변수들을 판별하는 well-balanced screening 모듈, (2) 예측모델을 자율적으로 자동 생성하는 autonomous metamodeling 모듈, (3) 적합한 최적화 기법을 자율적으로 선정하는 rule-based optimizer 모듈, 그리고 (4) 산업체 엔지니어 관점에서의 최적설계 결과 보고서를 자동 생성하는 DAVIS (data analysis, visualization, and interactive storytelling) 모듈이다.

AADO 기술의 첫 번째 모듈인 well-balanced screening 모듈은 모든 성능지수를 균형 있게 (balanced) 고려하여 주요 설계변수를 선정한다. 이를 위하여 실험계획법의 샘플링 기법을 이용하여 주어진 설계문제에 적합한 개수의 데이터를 자율적으로 자동으로 획득하고, 획득된 데이터로부터 각 성능에 대한 민감도 분석을 수행하고, 모든 성능들을 균형 있게 고려하여 주요 설계변수를 선정한다. Well-balanced screening 모듈을 구현한 자세한 알고리즘은 복잡하여 이 논문에 기술하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단하여 이에 대한 설명은 생략한다.

두 번째 모듈은 autonomous metamodeling 모듈로, 주요 설계변수의 함수로 각 성능지수를 예측할 수 있는 메타모델을 생성하기 위해 시뮬레이션을 통해 얻는 labeled data 획득부터 메타모델 생성에 이르는 전 과정을 자율적으로 진행하는 모듈이다. 각 성능지수의 메타모델을 생성할 때 필요한 적절한 labeled data 수와 메타모델 생성 기법은 성능지수와 설계변수 간의 비선형성 정도에 따라 달라진다. 만약 성능지수와 설계변수 간의 비선형성 정도가 약하다면 적은 수의 labeled data로도 정확한 메타모델을 만들 수 있지만, 비선형성 정도가 강하다면 필요한 labeled data 수가 기하급수적으로 증가할 수 있다. 그런데 문제는 이 비선형성 정도를 미리 알 수 없다는 점이다. 또한 실제 제품의 성능지수 값을 구하기 위한 시뮬레이션을 통해 1개의 labeled data를 얻기 위하여 소요되는 비용은 일반적으로 비싸다. 따라서 각 성능의 비선형성 정도를 반영하여 최소의 데이터를 이용하여 정확한 예측모델을 생성할 수 있는 로직이 필요하다. Autonomous metamodeling 모듈은 우선 성능지수와 설계변수 간의 비선형성 정도가 약하다고 가정하여 simple quadratic 모델을 생성할 수 있는 $2n+1$개의 labeled data로 시작한다. 여기서 n은 설계변수의 개수이다. 비선형성 정도가 약하다면 이 개수로도 정확한 메타모델을 생성할 수 있다. 그러나 비선형성 정도가 $2n+1$개의 labeled data로 정확한 메타모델을 생성할 수 없다면 추가 labeled data를 획득해야 한다. 이때 추가 데이터를 얻는 샘플(설계점)의 위치와 개수는 "순차적 샘플링 기법"을 통해 정한다. Autonomous metamodeling 모듈은 성능지수의 다양한 비선형성을 감안하면서 최소의 labeled data로 정확한 메타모델을 생성하기 위하여 아래와 같은 절차를 자율적으로 자동 수행한다.

1. 순차적 샘플링 기법을 통해서 필요한 최소의 추가 labeled data를 획득한다.
2. 추가 획득한 labeled data를 포함하여 주어진 labeled data로 가장 적합한 메타모델을 AI/ML 기술로 생성한다.
3. 생성한 메타모델의 오차를 평가하여, 사용자가 정의한 정확도를 만족하면 절차를 마치고, 정확도를 만족하지 않으면 단계 1로 돌아가 수렴할 때까지 반복한다.

Autonomous metamodeling 모듈을 구현한 자세한 알고리즘은 상당히 복잡하여 이 논문에 기술하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단하여 이에 대한 설명은 생략한다.

세 번째 모듈은 rule-based optimizer 모듈로, 정의된 설계문제에 적합한 최적화 기법을 자율적으로 선정하여 최적화를 자동 수행한다. 주어진 설계문제와 목적에 따라 가장 적합한 최적화 기법이 다를 수 있다. 설계문제의 유형과 최적화 목적에 따라 최적화 전략이나 활용 정보가 달라지기 때문에 다양한 최적화 기법이 공존한다. Rule-based optimizer 모듈은 다양한 최적화 문제에 대응할 수 있는 검증된 기법들을 기반으로, 규칙에 따라 주어진 설계문제에 적합한 최적화 기법을 자율적으로 선정한다. Rule-based optimizer 모듈은 아래와 같은 대표적인 최적설계 문제 유형에 대응이 가능한 최적화 기법들을 제

공한다.

- 효율적인 최적화를 위한 local optimizer
- 전역 최적해 탐색이 가능한 global optimizer
- 이산 설계변수를 효과적으로 다루는 discrete optimizer
- 다중목적함수 최적화 문제의 Pareto set을 구하는 multi-objective optimizer

마지막 모듈은 DAVIS 모듈로, AADO 절차를 수행하던 중 획득한 데이터와 자율적으로 획득한 추가 데이터를 분석하여 설계자가 통찰력을 얻을 수 있도록 데이터 스토리텔링 (data storytelling) 방식을 활용하여 최적설계 결과 보고서를 자동으로 생성한다. 여기서 "데이터 스토리텔링 방식"이란 단순히 도출된 데이터만 제공하는 것이 아니라, AADO 기술을 적용하여 얻은 다양한 설계 결과 데이터를 가공하여 narratives와 visuals로 출력함으로써 산업체 엔지니어가 쉽게 인사이트를 얻을 수 있도록 하는 방식이다.

AADO 기술의 개요를 그림 5에 도시하였다. 산업제품 설계를 하려면 먼저 "설계문제 정식화"와 "해석절차 정립"을 해야 하는데, 이들은 제품 별로 다르고 설계하고자 하는 제품에 정통한 산업체 전문가가 수행하여야 한다. 전문가가 수행한 "Formulation"(설계문제 정식화)과 "'Simulation' OR 'Labeled Data'"(해석절차 정립)를 그림 5의 왼쪽 위에 표기하였다. 이러한 입력이 주어지면, "intelligent autonomous automatic tool"인 AADO 기술의 핵심 모듈들이 자율적으로 자동 수행되어 최적설계 결과를 얻고, 최적설계 결과 보고서인 DAVIS를 자동 제공함으로써 산업체 엔지니어가 인사이트를 얻을 수 있도록 한다.

AADO 기술을 구현한 2개의 소프트웨어를 개발하였다. 해석절차 정립의 결과로 "Simulation" 모델을 제공하는 경우에 사용하는 소프트웨어는 "AIDesigner sim"으로, 해석절차 정립의 결과로 "Labeled Data"를 제공하는 경우에 사용하는 소프트웨어는 "AIDesigner tab"으로 각각 명명하였다.

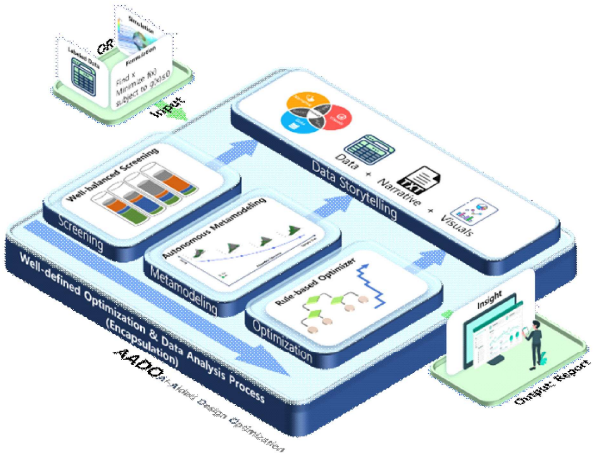

그림 5 AI 기반 설계 최적화
Fig. 5 AI-Aided design optimization

4.2 정류기 다분야통합최적설계

그림 5에 도시한 AADO 기술은 2가지의 입력을 요구한다. 하나는 설계문제 정식화 결과이고, 또 하나는 해석을 위한 "Simulation" 모델 또는 "Labeled Data"이다. 이 연구에서는 해석을 위하여 "Simulation"모델을 사용하므로, AADO 기술을 구현한 소프트웨어인 AIDesigner sim을 사용한다.

500 kW급 SiC 기반 UPS 정류기의 경우, 2.2절에 기술한 바와 같이 설계문제를 정식화하였다. 표 2에 나열한 목적함수 1개, 구속조건 9개, 설계변수 9개는 AIDesigner sim의 UI를 이용하여 쉽게 입력할 수 있다.

그리고 500 kW급 SiC 기반 UPS 정류기의 경우, 3절에 기술한 바와 같이 주어진 9개의 설계변수 값에 상응하는 10개의 성능지수 값을 구하는 해석을 위하여 3개의 simulation 모델을 사용하는데, 회로 해석을 위하여 상용 소프트웨어인 "PSIM", 리액터 해석을 위한 "수식 모델", 방열판 열 해석을 위하여 상용 소프트웨어인 "Icepak"을 사용한다. AIDesigner sim을 활용하려면 해석절차가 자동 실행되어야 한다. 해석 자동화를 위해 구축한 다분야통합해석 절차에 대한 자세한 설명은 3절에 기술하였고, 그림 4에 도시하였다. 그림 4에 명시되어 있는 바와 같이 9개의 설계변수 값이 주어지면 상응하는 10개의 성능지수 값이 자동으로 도출된다.

이제 500 kW급 SiC 기반 UPS 정류기의 MDO를 수행하기 위하여, 3절에 기술한 다분야통합해석 절차와 AIDesigner sim을 그림 6과 같이 연동하였다. 다분야통합해석 절차와 연동하여 AIDesigner sim의 screening, metamodeling, optimization 모듈들을 순차적으로 수행하여 얻은 주요 결과들을 여기에 기술한다. AIDesigner sim의 출력은 최적설계 결과 보고서인 DAVIS이다. DAVIS에는 MDO 결과는 물론 목적함수 개선을 위한 각 설계변수의 기여도 분석 결과, 성능지수 간의 상충성 분석 결과, 전역 민감도 해석 결과들을 다양한 narratives와 visuals로 제공하지만 논문 양식에는 적합하지 않아 사용하지 않았다.

Well-balanced screening 모듈을 이용하여 총 10개의 성능지

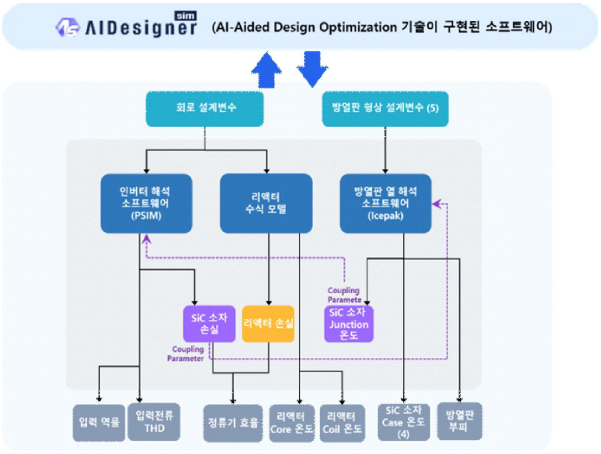

그림 6 자동화된 다분야통합해석 절차와 AIDesigner sim의 연동
Fig. 6 Interface between automated multidisciplinary analysis and AIDesigner sim

수들을 균형 있게 고려하여 주요 설계변수들을 판별하였다. 그 결과, 9개의 설계변수 중 7개가 주요 설계변수로 선정되었고, 성능지수들에 영향이 미미한 “DC 전압”과 “출력 필터 C 값”은 이후의 최적설계 과정에서는 제외되며 초기 값으로 고정하였다. 이로써 이후의 최적설계를 보다 효율적으로 수행할 수 있었다.

Autonomous metamodeling 모듈을 이용한 결과를 표 3에 나열하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 8개 성능지수의 메타모델 오차율이 0.1-8.4 %로 목표 오차율 10.0 % 미만의 값을 가진 8개의 메타모델들을 성공적으로 생성하였다. 설계문제 정식화 결과를 나타낸 표 2의 설계요구사항에 포함된 10개 성능지수 중 “방열판 부피”와 “정류기 효율”은 짧은 시간에 산출될 수 있으므로 메타모델은 생성하지 않고 산출된 정확한 값을 그대로 사용하였다.

표 3 Autonomous metamodeling 결과
Table 3 Autonomous metamodeling results

변수 명	목표 오차 [%]	모델링 오차 [%]
입력 전류 THD	10	8.4
입력 역률	10	3.4
SiC 소자 1 케이스 온도	10	0.1
SiC 소자 2 케이스 온도	10	0.2
SiC 소자 3 케이스 온도	10	0.2
SiC 소자 4 케이스 온도	10	1.3
리액터 코일 온도 상승	10	0.1
리액터 코어 온도 상승	10	0.1

생성된 메타모델을 기반으로 rule-based optimizer 모듈을 실행하여 얻은 MDO 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에 포함된 설계변수 초기 값은 UPS 제조사에서 제공한 값을 사용하였고, 목적함수인 부피와 9개 구속조건의 초기 값은 그림 4에 도시한 다분야통합해석 절차를 통해 설계변수 초기 값에 상응하는 값을 구한 것이다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 9개의 회로 성능지수 및 온도 구속조건들을 모두 만족하면서 목적함수인 방열판 부피를 초기 값 대비 36.1 % 줄인 주요 설계변수 7개의 최적 값을 하한과 상한 범위 내에서 성공적으로 얻을 수

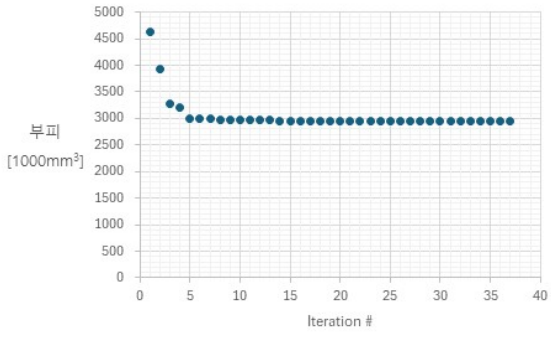

그림 7 목적함수의 최적해로의 수렴 과정
Fig. 7 Convergence history of the objective function

표 4 MDO 결과
Table 4 MDO Results

분류	변수 명	하한값	초기값	최적값	상한값
주요 설계 변수	스위칭 주파수 [kHz]	4.8	9.9	15.0	15.0
	입력 필터용 리액터 인덕턴스 값 [mH]	0.15	0.15	0.26	0.52
	핀 높이 H_f [mm]	60	68.2	85.4	90
	핀 두께 t_f [mm]	0.5	0.55	0.5	1.5
	핀 간격 b [mm]	5	5.68	5.02	7
	베이스 두께 H_b [mm]	10	18.8	10.0	20
	길이 L [mm]	400	444	400	650
목적 함수	방열판 부피 (최소화)	-	4623	2956	-
구속 조건	입력 전류 THD [%]	-	2.2	1.6	2.5
	입력 역률	0.99	1.0	1.0	-
	정류기 효율 [%]	98.5	99.14	99.88	-
	리액터 코일 온도 [℃]	-	93.2	94.4	100
	리액터 코어 온도 [℃]	-	94.2	96.6	
	SiC 소자 1 케이스 온도 [℃]	-	71.3	72.6	80
	SiC 소자 2 케이스 온도 [℃]	-	77.7	80.2	
	SiC 소자 3 케이스 온도 [℃]	-	79.4	77.6	
	SiC 소자 4 케이스 온도 [℃]	-	78.7	77.6	

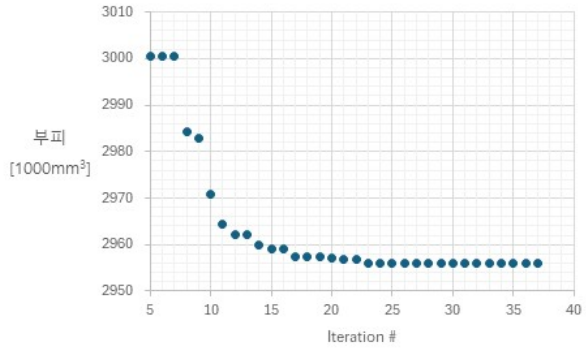

그림 8 목적함수의 Iteration #5부터 #37까지의 수렴 과정
Fig. 8 Convergence history of Iteration #5 through #37

있었다. 최적화 기법으로는 전역 최적해 탐색이 가능한 global optimizer인 Hybrid Meta heuristic Algorithm[10]을 사용하였다. 목적함수의 최적해로의 수렴 과정은 그림 7에 도시하였다. 그런데 그림 7에서 Iteration #5부터 #37까지 동일한 값처럼 보이므로, 그림 8에 이 부분을 확대하여 수렴 과정을 보였다. 이 과정이 필요한 이유는 9개의 구속조건을 모두 만족시키기 위해서이다. 안정적으로 수렴하는 많은 최적화 문제의 목적함수는 이러한 수렴 과정을 보인다. 그림 7과 8에서 볼 수 있는 바와 같이 최적해로 잘 수렴하였음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

500 kW급 SiC 기반 UPS 정류기의 설계문제 정식화 결과를 2절에 기술하였다. 이 설계문제는 회로 성능과 온도 성능을 동시에 고려하여 설계해야 하는 다분야통합설계 문제이다. 또한 주어진 설계변수 값에 상응하는 성능지수 값을 산출하는 다분야통합해석 절차를 3절에 기술하였다. 4-1절에는 공학설계에 대한 전문지식이 부족한 산업체 엔지니어도 쉽게 사용하여 신뢰성 있는 최적설계 결과를 얻을 수 있는 AADO 기술과 이 기술을 구현한 소프트웨어들을 간략히 소개하였다. 그리고 그림 6에 도시한 바와 같이 자동화된 다분야통합해석 절차와 AIDesigner sim을 연동하여, 2절에 정의한 9개의 구속조건을 동시에 만족하면서 목적함수인 방열판의 부피를 최소화하는 7개 주요 설계변수의 최적 값을 하한과 상한 사이에서 구한 정류기 MDO 결과를 성공적으로 얻었다. 이 논문의 저자들은 다양한 전력전자시스템 설계를 수행하는 산업체 엔지니어들이 최신 AADO 기술 및 소프트웨어를 활용하여 경쟁력 있는 제품설계 결과를 얻기를 기대한다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (20212020800020. Development of High Efficiency Power Converter based on Multidisciplinary Design and Optimization Platform)

References

[1] J. W. Kolar, J. Biela and J. Minibock, “Exploring the Pareto Front of Multi-Objective Single-Phase PFC Rectifier Design Optimization - 99.2% Efficiency vs. 7kW/dm3 Power Density,” 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 2009.
DOI:10.1109/IPEMC.2009.5289336

[2] Edemar O. Prado, Pedro C. Bolsi, Hamiltom C. Sartori and Jose R. Pinheiro, “Design of Uninterruptible Power Supply Inverters for Different Modulation Techniques Using Pareto Front for Cost and Efficiency Optimization,” Energies, vol. 16, no. 3, pp. 1314, Jan. 2023.
DOI:10.3390/en16031314

[3] Xiaoqian Li, Guichen Zhang and Qi Zhang, “Research on Optimization Simulation of Three-level Inverter in UPS Based on PSO Algorithm,” Journal of Physics: Conference Series, Volume 2290, 3rd International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering, April 2022.
DOI:10.1088/1742-6596/2290/1/012021

[4] Tiago J. L. Oliveira, Luís M. A. Caseiro, André M. S. Mendes, Sérgio M. A. Cruz and Marina S. PerdigãO, “Online Filter Parameters Estimation in a Double Conversion UPS System for Real-Time Model Predictive Control Performance Optimization,” IEEE Access, vol. 10, Mar. 2022.
DOI:10.1109/ACCESS.2022.3159968

[5] Heng Tang, Bunne So, Sokvan In, Panha Soth, Socheat Yay and Chivon Choeung, “Single-Phase UPS Inverter Using Offset-Free Optimizing Control with Digital All-Pass Filter,” International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation, Nov. 2023.
DOI: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427840

[6] Dong-Ju Lee, Jae-Wang Choi and Jong-Gyeum Kim, “Design Optimization of Filters and Power Stacks in Three-Phase Transformer-less UPS including SiC devices,” 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2023.
DOI: 10.1109/ICEMS59686.2023.10345358

[7] B. L. Choi, Y. Lee, J. M. Min and D. H. Choi, “Designer-oriented AI-aided Design Optimization,” NAFEMS World Congress 2023.

[8] PIDOTECH Inc., PIAnO User's Manuals and Tutorials, 2024.

[9] PIDOTECH Inc., AI-Aided Design Optimization for Democratizing Design Optimization of Industrial Products, 2024.

[10] K. B. Park, An Efficient Hybrid Metaheuristic Algorithm for Solving Constrained Global Optimization Problems, Ph.D. Thesis, Hanyang University, Feb. 2016.

저자소개

최동훈(Dong-Hoon Choi)

He is currently CEO of PIDOTECH Inc. since 2003, and Emeritus professor at Hanyang University. He was a professor in the School of Mechanical Engineering at Hanyang University from 1986 to 2018. He received his Ph.D degree from University of Wisconsin, M.S. degree from KAIST in 1977, and B.S. degree in 1975. His research interests include developments of AI-aided design optimization, Process Integration and Design Optimization (PIDO) software, and their application to engineering systems.

이동주(Dong-Ju Lee)

He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Chungnam national university, Daejon, Korea, in 1996, 1998 and 2021, respectively. From 1999 to 2010, he worked at R&D department of Ehwa Technologies Information as a chief research engineer for the development of commercial uninterruptible power supply system and military 400Hz power converter system. From 2010 to 2017, he worked at R&D department of Kukje Electric Co., Ltd. as a chief design engineer for the development of transformer-less uninterruptible power supply system and he is a chief technology officer for the developments of energy storage system since 2017. His research interests are in the areas of analysis and design of power conversion system.