

전기로의 전력 절감을 위한 AI 기반 전력효율 분석 시스템

편지석, 양현호, 장재민, 박광로*, 권순량*

동명대학교 전자공학과, *(주)솔위드

pyun050505@naver.com, yanghh3965@naver.com, 86woals@naver.com, *krpark.solwith@gmail.com, *srkwon@tu.ac.kr

AI-based power efficiency analysis system for electric arc furnace power reduction

Pyeon Ji Seok, Yang Hyeon Ho, Jang Jae Min, Park Gwang Ro*, Kwon Soon Ryang*

Dept. of Electronic Engineering, Tongmyong Univ., *Solwith Co.

요약

전기로를 기반으로 하는 전기로 제강 공정은 국내 철강 산업에서 가장 높은 전력 소비를 요구하는 대표적 에너지 다소비 공정이며, 생산비 절감과 탄소중립 요구가 동시에 증가하는 환경 속에서 전력효율 관리의 중요성이 급격히 부각되고 있다.

본 논문에서는 전기로 공정에서 발생하는 대규모 전력 소비를 효율적으로 관리하고 절감하기 위하여, 인공지능 기반 전력효율 분석 시스템을 설계 및 구현하고 그 실용 가능성을 검증하고자 한다.

I. 서 론

전기로(Electric Arc Furnace, EAF) 공정은 스크랩 용해 과정에서 대규모 전력을 소비하는 대표적인 고에너지 집약형 공정으로, 스크랩 구성비와 장입량, 공정 단계별 운전 조건에 따라 전력 사용량이 크게 변동한다. 그러나 실제 산업 현장에서는 이러한 요인들이 통합적으로 관리되지 못하고, 전력 사용 패턴 분석 또한 사후 통계 분석이나 모니터링 수준에 머무르는 경우가 많아, 공정 효율 평가와 운영 의사결정이 여전히 조업자의 경험적 판단에 의존하는 한계가 존재한다.

본 논문에서는 전기로 공정에서 생성되는 스크랩 장입 정보, 공정 단계별 시간 데이터, 초 단위 전력 사용량 데이터 등의 공정 데이터를 체계적으로 수집하여 정규화하고, 이를 기반으로 XGBoost 등 회귀 모델을 적용하여 전력 소비량을 예측하고 전력 효율을 정량적으로 분석할 수 있는 AI 기반 전력효율 분석 시스템을 설계 및 구현한다. 예측값과 실제값의 잔차 분석을 통해 비효율 발생 구간을 자동 탐지하도록 설계하고, 운영자가 공정변동 특성을 직관적으로 확인할 수 있도록 시각화 대시보드와 성능지표 분석 기능을 함께 제공한다.

II. 본론

2.1 시스템 업무 프로세스



그림 1. AI 기반 전력효율 분석 시스템의 업무 프로세스

그림 1은 본 논문에서 제안하는 AI 기반 전력효율 분석 시스템의 업무 프로세스를 나타낸 것이다.

본 시스템은 전기로 조업 데이터를 기반으로 전력 소비 패턴을 분석하고, 인공지능 모델을 활용하여 전력효율을 예측·평가하기 위해 설계되었다. 시스템은 크게 데이터 수집 계층, 데이터 전처리 및 저장 계층, AI 모델 학습 및 예측 계층, 시각화 및 결과 활용 계층, 운영자 관리 계층으로 구성된다.

2.2 기능 정의

표 1은 AI 기반 전력효율 분석 시스템의 기능을 나타낸 것이다.

표 1. AI 기반 전력효율 분석 시스템의 기능

기능	세부 기능	기능	세부 기능
공정 데이터 수집 및 입력	공정 데이터 업로드 및 저장 장기 공정 데이터 자동 관리 공정 데이터 정확성 확보 실시간 데이터 정규화 처리 데이터 품질 관리 및 알림	AI 모델 학습 및 선택 모델 재학습 및 저장	과거 데이터 기반 전력 예측 가상 공정 기반 예측 시뮬레이션
데이터 전처리 및 저장	공정 단계별 전력소비 분석 스크랩 조합별 전력 효율 비교 조건 기반 분석 실시간 대시보드 확인 미상값 및 패턴 변화 감지 분석 결과 내보내기	예측 결과 분석 및 시각화 회귀 성능 지표 확인 중요 변수 분석 예측 결과 파일 저장	운영자 계정 관리 운영자 인증

2.3 핵심 기능의 동작 흐름

그림 2는 AI 기반 전력효율 분석 시스템의 핵심 기능에 대한 동작 흐름을 나타낸 것이다.

그림 2의 위쪽 도면은 조업 데이터 수집 및 입력시의 동작 흐름, 아래쪽 왼편 도면은 AI 모델 학습 및 예측시의 동작 흐름, 아래쪽 중간 도면은 모델 성능 평가 및 최적 모델 선정시의 동작 흐름, 아래쪽 오른편 도면은 AI 분석 결과 시각화 및 리포트 제작시의 동작 흐름을 나타낸 것이다.

2.5 시스템 구현 및 시험

가. 개발 환경

설계된 시스템 구현 시에 적용된 개발 환경은 표 2와 같다

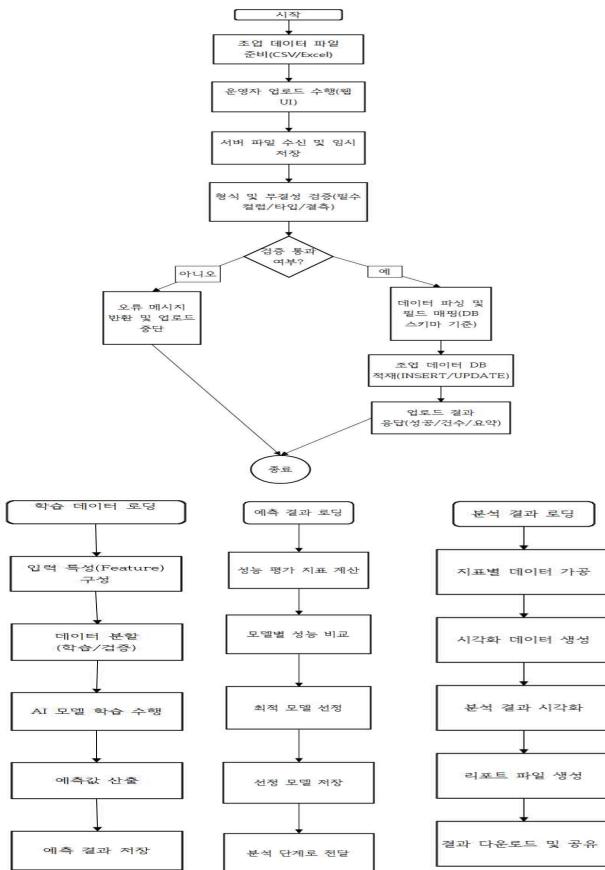


그림 2. 핵심 기능의 동작 흐름

표 2. 개발 환경

구분	내용
운영체제	Windows 10 / 11
개발 언어	Python 3.10
데이터 처리 도구	Pandas, NumPy
AI 모델	Scikit-learn, XGBoost...
백엔드/프론트엔드	FastAPI/Chart.js
데이터베이스	PostgreSQL

나. 서버 구현 (Flask + Socket.IO)

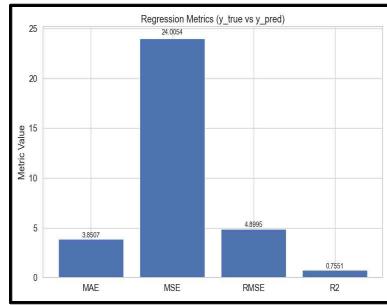
- 서버는 Flask 기반으로 구성하고 통신 방식은 Flask-SocketIO를 활용한 WebSocket 통신 환경을 채택하였다.
- 실시간 동작 검증을 위해 1초 주기로 랜덤 소비전력 값(850~1200 kW)을 생성하는 시뮬레이션 스레드를 구현하였다.
- 생성된 전력 데이터는 power_update 이벤트를 통해 클라이언트로 실시간 전송되도록 설계하였다.
- 비동기 처리를 위해 Eventlet 기반 비동기 처리 구조를 적용하여 서버의 실시간 응답성을 확보하였다.
- 그림 3은 서버 구현 및 시험 사례를 나타낸 것이다.

다. 클라이언트 구현 (HTML + Chart.js)

- 웹 브라우저 기반 대시보드를 구성하여 별도의 설치 없이 실시간 확인이 가능하도록 하였다.
- Chart.js를 활용하여 실시간 선 그래프를 구현하였으며, 최근 20개의 전력 데이터만 표시하도록 제한하여 가독성을 확보하였다.
- SocketIO 클라이언트를 통해 서버에서 전송되는 실시간 전력 데이터를 수신하고, 수신 즉시 그래프에 반영되도록 구현하였다.



a) 파일((CSV/Excel) 업로드 b) 로그인 성공



c) 회귀지표 시작화

그림 3. 시스템 구현 결과

III. 결론

본 논문에서는 전기로 공정 데이터를 입력받아 인공지능 기반으로 분석하고, 전력 효율을 정량적으로 평가할 수 있는 전력효율 분석 시스템을 설계 및 구현하였다. 제안한 시스템은 데이터 수집·전처리 구조, XGBoost 기반 전력 소비 예측 모델, 비효율 탐지 기능, 그리고 시각화 대시보드를 포함하며, 특히 예측값과 실측값의 차이를 이용한 비효율 구간 탐지를 통해 전기로 공정 내 에너지 낭비 요인을 정량적으로 식별할 수 있음을 확인하였다.

또한 실시간 전력 시각화 모듈을 구현하여, 전력 사용 패턴과 이상 징후를 운영자가 직관적으로 모니터링할 수 있는 환경을 구축하였다.

향후 실제 공정 데이터 연동과 강화학습 기반 공정 최적화 기술을 적용하여, 전력 최소화를 위한 최적의 공정 조건 조합을 도출하는 방향으로 연구를 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부 탄소중립산업핵심기술개발사업 (과제번호: RS-2023-00262191)의 지원을 받아 수행되었습니다.

본 연구는 동명대학교 RISE사업의 캡스톤디자인 과제를 통해 창출된 성과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Mahmoud Makki Abadi, Hongyan Tang, Mohammad Mehdi Rashidi, "A review of simulation and numerical modeling of electric arc furnace (EAF) and its processes", Heliyon 10, 2024.
- [2] Xiaoyu Yi, Qiang Yue, Zhihe Dou, and Qingcai Bu, "Enhancing Efficiency in Electric Arc Furnace Steelmaking: A Multi-Objective Optimization Approach Using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II", steel research article, september 2024.
- [3] Mahmoud Makki Abadi, Hongyan Tang, and Mohammad Mehdi Rashidi, "A review of simulation and numerical modeling of electric arc furnace (EAF) and its processes", Heliyon, June 2024.