

랩세미나

지도교수님 논문 리뷰 및 학술 논문 연결 방안

논문: 스마트 미터링 시스템 이상 탐지 및 전력 관리

Anomaly detection of smart metering system for power management with battery storage system/electric vehicle (Sangkeum Lee et al., ETRI journal, 2023)

적용 논문: 고속 푸리에 변환(FFT) 기반 주기 추출 및 윈도우 구성을 활용한 GELU CNN-GRU AE 모델의 산업 전력 시계열 이상치 탐지

EcoAI

3팀: 권우현, 박범도

발표일: 2025. 05. 29.

교수님 논문 리뷰 및 학술 논문 연결 방안

CONTENTS

01 연구 배경

02 이상치 탐지 방법론

03 논문 연결 방안

교수님 논문 리뷰 및 학술 논문 연결 방안

01 연구 배경

스마트 미터링 시스템의 부상

스마트 미터 이전

- 전력 시스템의 복잡성이 증가, 공급자와 소비자 간의 상호작용을 기반으로 한 **스마트 계량 및 제어 시스템** 필요성 증가
- 에너지 소비 측정 후 전자 통신 네트워크를 통하여 세부 정보를 다른 사람에게 직접 송수신 가능한 전자 시스템 등장
-> **스마트 미터**

스마트 미터 이후

- 대용량 정보 수집, 속도 및 다양성에 의해 정보 수집도 크게 향상, 빅데이터 분석에서 큰 명성을 얻음
- 전기적 신호에서 최적의 모니터링 및 제어로 **안정성 및 효율성 증가**로 스마트 미터는 큰 자산이 됨

스마트 미터의 오류 발생 및 연구 목표

스마트 미터의 오류

- 날씨나 점유자의 이상 행동, 장비 및 제어 시스템 오류로 **이상치**가 발생
- 스마트 미터는 에너지 효율성을 높여야 함과 동시에, 실제 전력 소비와 예측 전력 소비 간의 불일치가 줄어들 때,
에너지 관리 성능이 향상되며 **비용 절감**에서 유리
- 따라서, **이상 감지**가 가능한 스마트 미터링 기술이 필요하며, 논문에서는 **이상값과 결측값을 감지**할 수 있는 스마트 미터링 시스템을 제안

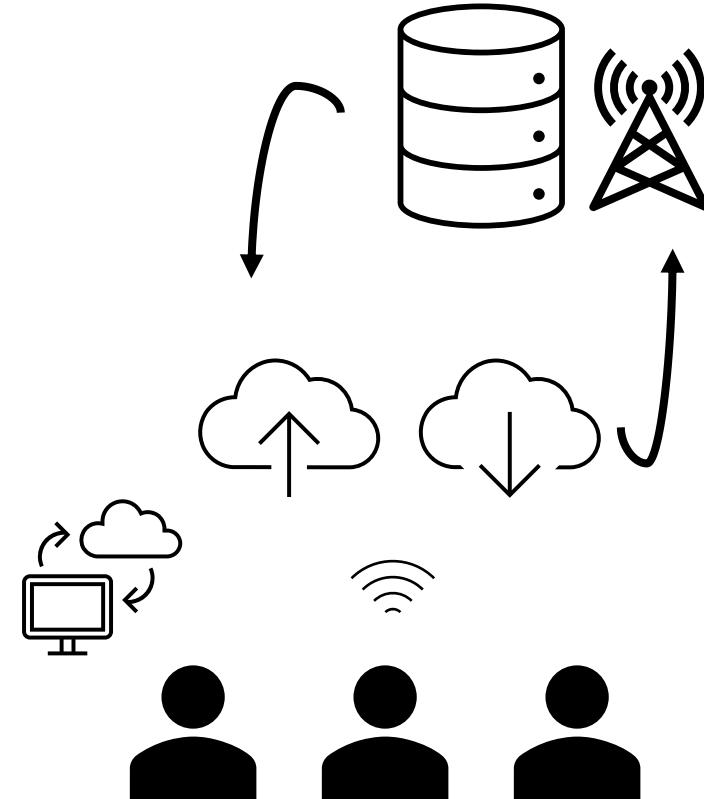
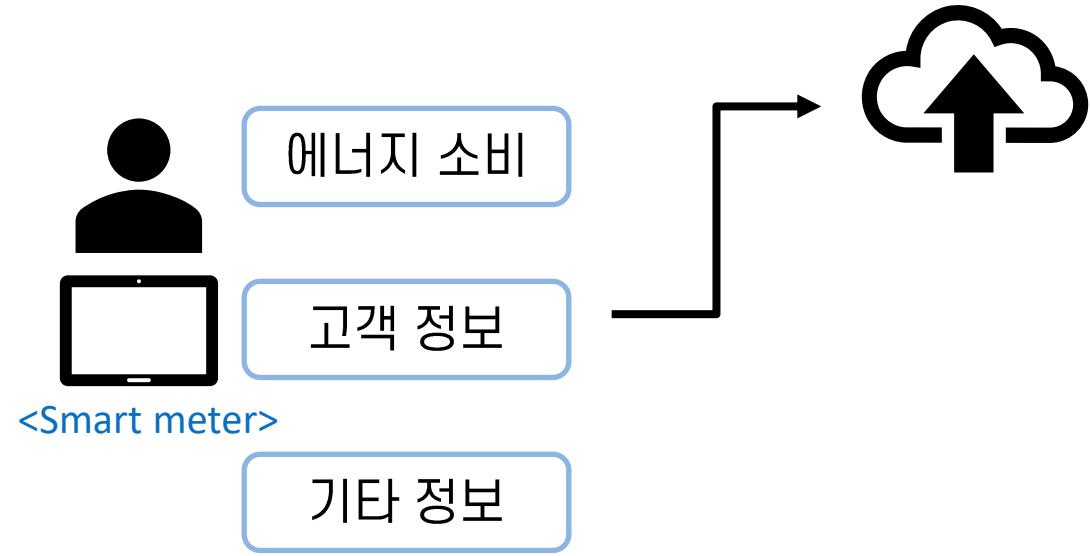
연구 목표

- ✓ **이상치 탐지 기능**이 탑재된 스마트 미터링 기술 개발
- ✓ 피크 부하 및 전기 비용 절감을 위한 **예측 유형**의 전력 관리 구현
- ✓ **GCN-BiLSTM Autoencoder** 모델로 스마트 미터 데이터의 미래 가치 예측
- ✓ 다중 목표 함수를 사용하여 최적화

교수님 논문 리뷰 및 학술 논문 연결 방안

02 이상치 탐지 방법론

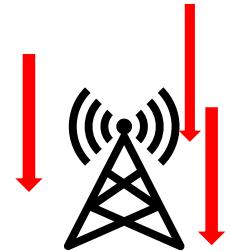
클라우드 기반 스마트 미터링 시스템



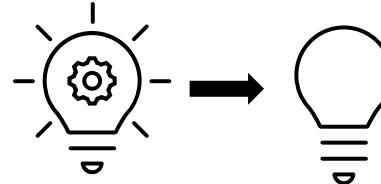
이상 감지



측정 기기 고장



측정 센서 성능 저하



정전



설치 오류 및 보호 불량



의도적인 손상

- 이상치는 **무작위** 발생
- 간격 이상 또는 불연속성 발생 -> 전력 관리 프로세스의 정확도 떨어짐
- 이상치 제거를 위해 **Autoencoder** 채택 및 새로운 데이터에 대한 결과 예측
- 이상 감지가 가능한 스마트 미터로 **비용 절감** 및 에너지 소비 **최적화**

GCN-BiLSTM Autoencoder

GCN-양방향 LSTM 네트워크

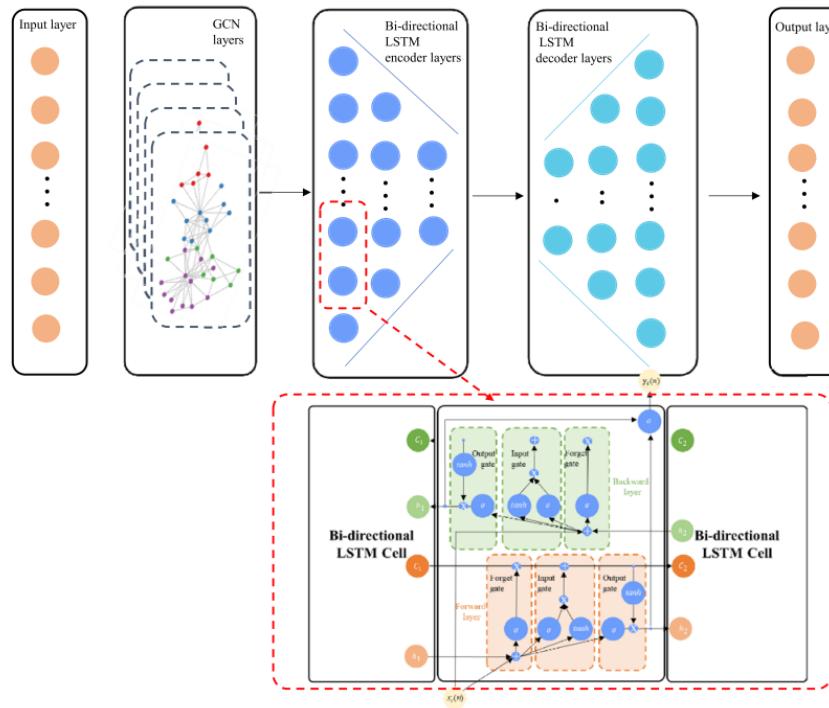


FIGURE 4 Autoencoder implemented with GCN-BiLSTM network for anomaly detection

GCN

- GCN은 CNN과 달리, 노드 연결 수가 다양하고 노드가 정렬되어 있지 않음
- 노드 간 관계에 더 집중을 하며, 과거의 데이터로 인해 미래에 영향을 받는 부분을 더 강하게 반영
- 시계열 데이터에 적합

LSTM

- 기존의 RNN에서 장·단기 문제점을 보완한 셀 형식의 네트워크
- Input, forget, cell, output 레이어로 구성

GCN-BiLSTM Autoencoder

GCN-양방향 LSTM 네트워크

$$\mathbf{i}_t = \sigma(\mathbf{W}_{ii}\mathbf{x}_t + \mathbf{b}_{ii} + \mathbf{W}_{hi}\mathbf{h}_{(t-1)} + \mathbf{b}_{hi}), \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_t = \sigma(\mathbf{W}_{if}\mathbf{x}_t + \mathbf{b}_{if} + \mathbf{W}_{hf}\mathbf{h}_{(t-1)} + \mathbf{b}_{hf}), \quad (2)$$

$$\mathbf{g}_t = \tanh(\mathbf{W}_{ig}\mathbf{x}_t + \mathbf{b}_{ig} + \mathbf{W}_{hg}\mathbf{h}_{(t-1)} + \mathbf{b}_{hg}), \quad (3)$$

$$\mathbf{o}_t = \sigma(\mathbf{W}_{io}\mathbf{x}_t + \mathbf{b}_{io} + \mathbf{W}_{ho}\mathbf{h}_{(t-1)} + \mathbf{b}_{ho}), \quad (4)$$

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t * \mathbf{c}_{(t-1)} + \mathbf{i}_t * \mathbf{g}_t, \quad (5)$$

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t * \tanh(\mathbf{c}_t), \quad (6)$$

LSTM 구조

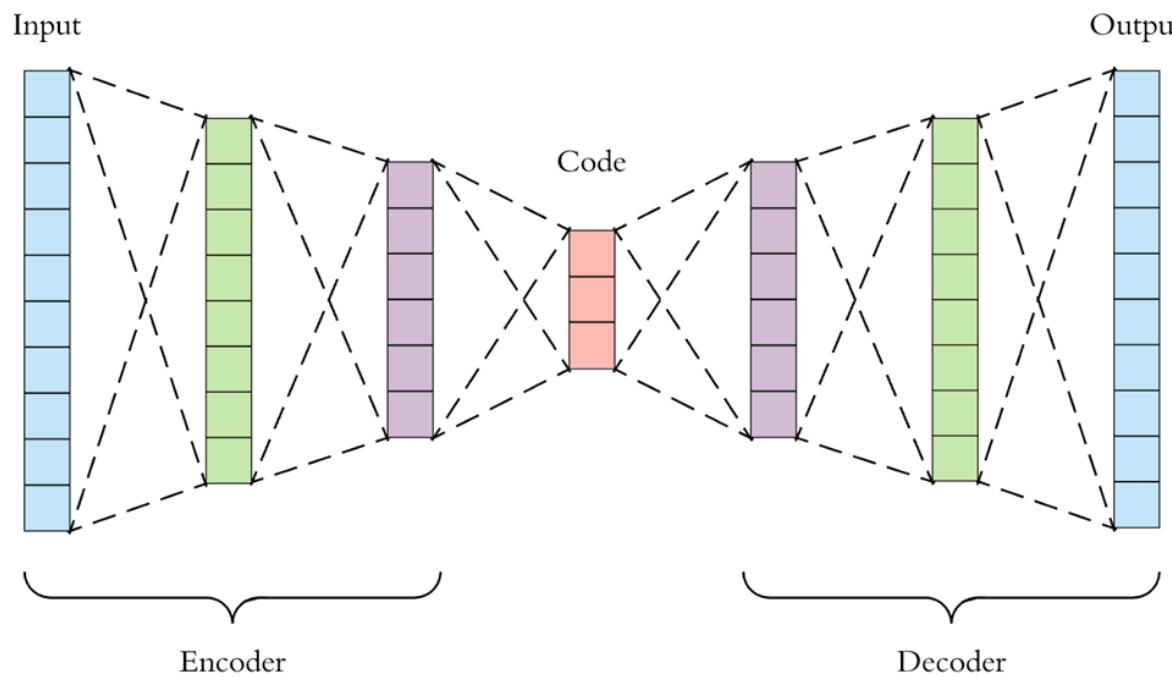
- Input, forget, cell, output 으로 구성
- Sigmoid: 0과 1의 값 출력, Input과 forget에서 데이터 분리 여부 결정, output에서는 LSTM 구조의 어느 부분에 출력할지 결정
- Tanh: Sigmoid로 결정된 output 값에 적용하여, 0~1 사이의 값 출력

BiLSTM

- LSTM의 순차적 구조 대신, 양방향으로 데이터를 처리하여 데이터의 정보를 더욱 풍부하게 반영
- 따라서 두 개의 독립적인 LSTM 네트워크 사용, 하나는 순방향, 하나는 역방향으로 데이터 계산

GCN-BILSTM Autoencoder

Autoencoder



Autoencoder

- GCN-BILSTM으로 구성된 네트워크에 입력층을 구성하여, 데이터 시퀀스를 처리
- 처리된 시퀀스는 Decoder에서 **입력 데이터**(Encoder) 및 **예측 데이터** 재구성 -> **임계값**을 기반으로 이상값 검출

교수님 논문 리뷰 및 학술 논문 연결 방안

03 논문 연결 방안

비교 및 FFT 논문 문제점

	교수님 논문	FFT 윈도우 구성 GELU CNN-GRU AE 모델 논문
이상치 탐지 방법, 손실함수 및 평가 방법	<ul style="list-style-type: none"> GCN-BiLSTM Autoencoder로 이상치 탐지 MSE(평균제곱오차), ROC-AUC, F1 등 평가 손실함수: MSE (Mean Squared Error) 평가: Accuracy, Precision, Recall, F1, AUC 	<ul style="list-style-type: none"> FFT 기반 주기 추출 + GELU CNN-GRU AE DTW(동적시간왜곡) 재구성 오차 + Isolation Forest 이상치 판별 모델 손실함수: RMSE 이상 탐지: DTW 재구성 오차 IsolationForest

DTW 기반 재구성 오차만을 사용
 → 직관적이지만 값 해석이 어렵고 threshold 설정 주관적
 Isolation Forest로 윈도우별 이상치 score 산출
 → 마찬가지로 비지도적 분류 모델이라 절대적 기준이 없음

이상치로 판별된 시점의 개수, 윈도우별 이상 탐지율 등을 정량적 비교/일반화에 한계
 F1-score, AUC 등 표준적 분류/이상탐지 성능지표의 부재 → 연구간 객관성, 재현성 문제

FFT 논문 적용 전략

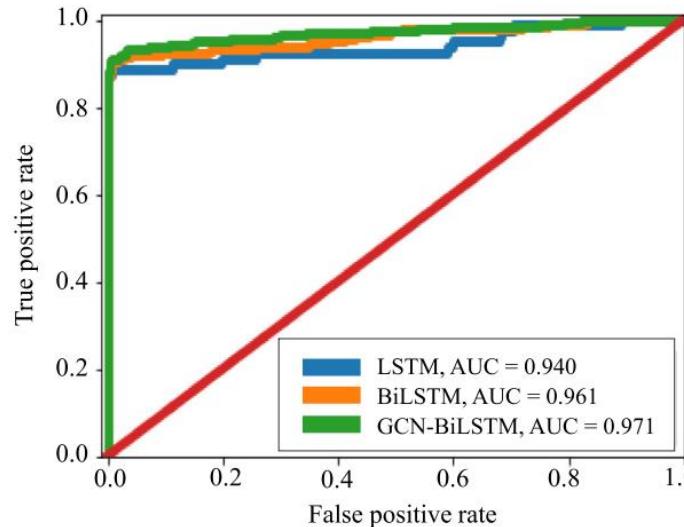


FIGURE 6 Performance validation using receiver operating characteristic (ROC) curve for three autoencoders with load dataset

TABLE 1 Simulation results

Category	Accuracy	Precision	Recall	F_1	MSE	Peak load	Electricity cost
Scenario 1	-	-	-	-	-	3.7 kW	\$44.8
Scenario 2	0.9925	0.9997	0.99976	0.99626	0.34	3.1 kW	\$31.7
Scenario 3	0.99336	0.99348	0.99984	0.99665	0.32	2.8 kW	\$30.5
Scenario 4	0.99293	0.99302	0.99988	0.99644	0.31	2.8 kW	\$30.3

[임계값 객관성 부여]

Isolation Forest-DTW 오차 분포 계산의 threshold(2.5) 선정 시
기준에는 임의로 지정한 임계값을 적용.

→ ROC 커브 기반 threshold 탐색하여 임계값을 적용하여 객관성 부여 방법

[평가 방법]

ground truth(실제 이상 구간 라벨) 데이터셋을 활용해
confusion matrix 생성 가능

Precision/Recall/F1-score/AUC 등 정량적 평가 가능

→ 여러 윈도우 크기별 이상 탐지율, FP/FN 비율을 분석해 모델의 강점·약점 진단

최종적으로

MSE, RMSE, DTW 등 다양한 오차 지표를 한 개의 표로 비교하여 제시

감사합니다
