

산업용 무효전력 예측을 통한 전력용 콘덴서 최적 용량 산정

최유빈, 조재영, 김선혁
국립공주대학교

202301893@smail.kongju.ac.kr, whwodud02@smail.kongju.ac.kr, seonh@smail.kongju.ac.kr

Optimal Capacity Calculation of Power Capacitors through Industrial Reactive Power Prediction

Yu Bin Choi, Jae Yeong Jo, Seon Hyeog Kim
Kongju National University

요약

산업 현장에서 전력 품질 관리와 에너지 효율화는 설비 안정성과 운영 비용 절감을 위해 필수적이며, 특히 무효전력은 전압 불안정 및 역률 저하의 주요 원인으로서 적절한 제어가 요구된다. 그러나 제철 공정과 같이 부하 변동이 크고 비선형적 특성을 가진 환경에서는 기존 실시간 제어 방식만으로는 안정적인 보상이 어렵다는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 변동성과 불규칙성이 큰 무효전력 시계열 데이터를 정밀하게 학습하기 위해 Transformer 기반 예측 모델을 제안하였다. Multi-head Attention과 Multi-layer Decoder 구조를 적용하였다. 제안 모델은 단일 시점, 단기 추세, 중기 추세에서 예측 실험을 수행한 결과, 단기 예측에서 높은 R^2 성능을 보였다.

I. 서론

실제 산업 현장에서 전력 품질 관리와 에너지 효율화는 운영 비용 절감 및 설비 안정성을 위해 필수적이다. 특히 무효전력은 전압 불안정을 유발하거나 전력 손실을 초래하는 주요 요인으로, 적절히 제어하지 못할 경우 역률 저하로 인해 계통의 안정성을 해칠 수 있다. 하지만 급변하는 부하 특성과 비선형적인 전력 소비 패턴을 가진 공정에서 실시간 보상으로의 제어는 한계가 존재한다 [1]. 따라서 본 연구에서는 무효전력과 같이 변동성이 크고 불규칙한 패턴을 가진 시계열 데이터를 어텐션 메커니즘을 통해 학습하는 Transformer 모델을 기반으로 한 예측 기법을 제안한다 [2]. 최종적으로 예측 값과 실제 데이터를 비교, 분석하며 제안 모델의 예측 정밀도를 검증하고, 도출된 무효전력 예측 데이터를 기반으로 전력 용 콘덴서의 최적 투입 용량을 사전에 산정하는 것을 목표로 한다.

II. 본론

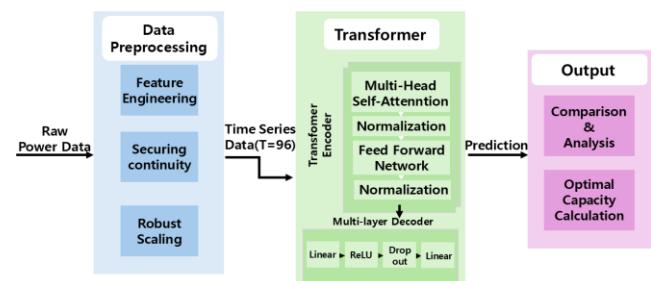
1. 데이터 구성 및 전처리

본 연구에서는 UCI에서 제공하는 데이터를 활용했으며, 사용한 데이터 셋은 실제 철강 공정 설비에서 15분 단위로 총 1년 간 수집된 에너지 소비 데이터이다 [3]. 데이터 셋의 주요 변수로는 유효 전력, 지상 및 진상 무효 전력, 역률 등이 포함되어 있으며, 전력용 콘덴서의 최적 용량 산정을 위한 핵심 지표로 지상 무효전력 데이터를 종속 변수로 설정하였다. 실제 전력 데이터에는 현장 특성상 설비의 돌발 정지나 급격한 기동으로 인한 이상치가 다수 포함되어 있다. 전력 데이터에 포함된 급격한 이상치를 고려하여, 중앙값과 사분위수 범위를 이용하는 Robust Scaling을 적용해 스케일 편차를 완화하였다. 또한 시계열 데이터 셋의 하루 동안의 전력 패턴을 반영하기 위해 윈도우 크기를 96(24시간)으로 설정하여 슬라이딩 윈도우 방식으로 구성하였다.

2. Transformer 기반 예측 모델 구조

제안하는 모델의 전체 구조는 [그림 1]에 제시하였다. 입력 시계열 데이터는 전처리 과정을 거친 후 Transformer의 인코더에 전달되고 인코더 내부의 Multi-Head Self-Attention 메커니즘은 모든 시점 간 상관관계를 병렬적으로 계산하여 복잡한 부하 변동 패턴을 추출한다. 이후 인코더가 생성한 고차원 특징을 최종 예측 값으로 변환하기 위해 단일 선형층 대신 Multi-layer Decoder 구조를 도입하였다 [4].

제철 공정의 전력 시계열은 대용량 설비의 전원 공급 및 간헐적 부하 변화로 인해 비선형적이며 급격한 스파이크가 빈번하게 발생한다. 단일 선형 변환만으로는 이러한 고차원적 변동 특성을 충분히 반영하기 어렵기 때문에 본 모델은 Linear, ReLU, Dropout, Linear 순서의 다층 구조를 구성하였다. ReLU 활성화 함수는 급격한 부하 변화와 불규칙 패턴을 포착할 수 있는 비선형 표현력을 확보하고, Dropout을 통해 특정된 특징 차원에 대한 과도한 의존을 방지하며 노이즈 및 이상치에 대한 일반화 성능을 향상시킨다. 이러한 구조적 설계는 Transformer Encoder가 추출한 시계열 문맥 정보를 재구성하여 무효전력 예측 값을 산출하는 데 기여한다.



[그림 1] Transformer 기반 예측 모델 블록 다이어그램

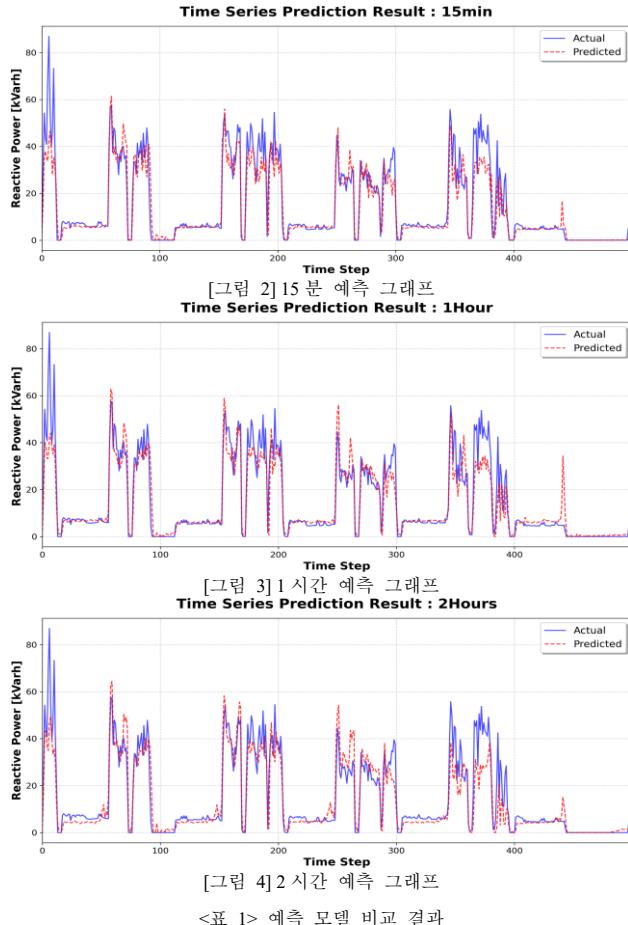
3.1 모델 학습 및 실험 설계

연구에서는 전체 시계열 데이터를 학습 55%, 검증 20%, 테스트 25%로 분할해 모델 학습 및 평가를 수행하였다. 모델의 실사용 가능성과 예측 안정성을 검증하기 위해 단기, 중기 예측에 대해 성능 비교 실험을 설계하였다. 구체적으로는 15분후, 1시간 후, 2시간 후의 무효전력 값을 각각 예측하도록 설정하여 예측 범위에 따른 성능을 비교하였다.

예측 모델의 성능 평가는 결정계수 R^2 Score, 평균 제곱근 오차 RMSE, 평균 절대 오차 MAE를 활용하였다. 이 중 실제 데이터 분산 중 모델이 설명할 수 있는 비율을 나타내는 지표인 R^2 Score를 변동성이 큰 제철소 전력 데이터를 평가하는 데 핵심적으로 활용했다.

3.2 예측 성능 비교 및 전력용 콘덴서 최적 용량 산정

[그림 2], [그림 3], [그림 4]는 예측 범위에 따른 예측 결과를 시각화한 것이며, <표 1>은 예측 정확도의 변화를 R^2 , RMSE, MAE 지표로 비교한 것이다. 예측 결과 R^2 는 15분 예측에서 0.8475, 1시간 예측에서는 0.7632, 2시간 예측에서는 0.7199를 기록했고, 이 중 15분 예측은 단기 예측의 결과로 가장 높은 R^2 를 기록하였다. 반면 가장 낮은 점수를 기록한 2시간 예측에서 첫 스텝 예측의 RMSE는 6.66kVarh이었으나, 마지막 스텝 120분에서는 9.60kVarh까지 상승하여 예측 범위 확장에 따른 오차가 점진적으로 증가하는 수치적 변화를 보여줬다.



예측 범위	R^2 Score	RMSE[kVarh]	MAE[kVarh]
15min	0.8475	6.3818	3.4845
1Hour	0.7632	7.9534	4.4957
2Hours	0.7199	8.6446	4.9303

예측된 무효전력을 기반으로 전력용 콘덴서의 최적 용량을 산정하기 위해 아래의 식 (1), (2)를 이용한다.

$$Q(t) = \frac{E_q(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

$$C_{opt} = F_Q^{-1}(0.95) \quad (2)$$

식 (1)은 15분 간격으로 측정된 무효 전력량을 기반으로 순시 무효전력으로 변환하는 식이며, $E_q(t)$ 는 시점 t 에서 15분 단위로 측정된 무효 전력량(kVarh), Δt 는 샘플링 간격, $Q(t)$ 는 단위 시간당 요구되는 무효전력(kVar)를 의미한다. 식 (2)는 서비스의 전체 요구 용량 중 95%를 만족하는 지점을 산출해, 전력용 콘덴서의 용량을 결정하기 위해 사용된다. 여기서 $F_Q^{-1}(0.95)$ 는 $Q(t)$ 의 분포에서 95%의 분위수를 뜻하고, C_{opt} 는 최적 커패시터 정격 용량(kVar)이다. 계산된 최적의 콘덴서 용량은 15분 예측의 경우 178.14kVar, 1시간 예측의 경우 174.46kVar, 2시간 예측의 경우 163.85kVar로 모두 약 160~180kVar 범위 내에 존재하며, 이는 예측 성능 차이에도 불구하고 커패시터 서비스 계획 관점에서는 안정적인 용량기준을 확보할 수 있음을 의미한다.

III. 결론

본 연구에서는 제철 공정과 같이 부하 변동이 크고 비선형적 특성을 갖는 산업용 전력 데이터를 대상으로, Transformer 기반 무효전력 예측 모델을 설계하고 예측 결과를 활용한 전력용 콘덴서 용량을 산정하였다. 기존 실시간 제어 방식이 가진 불규칙 부하에 대한 대응 한계를 보완하기 위해 Self-Attention 기반 시계열 예측 모델을 도입하였으며, 인코더가 추출한 고차원 특징을 효과적으로 변환하기 위해 다층 구조의 디코더를 구성함으로써 모델의 비선형 표현력을 일반화 성능을 강화하였다. 실험 결과, 단기 예측에서는 높은 R^2 를 기록하며 실제 부하 패턴을 정밀하게 추종하는 우수한 정확도를 보였다. 그러나 예측 범위가 1시간 및 2시간으로 증가함에 따라 RMSE가 점진적으로 상승하며 예측 오차가 누적되는 특성이 확인되었다. 향후 연구에서는 생산 공정 스케줄, 서비스 가동 계획, 부하 예측 정보 등을 통합적으로 고려하는 전력 운영 스케줄링 분야로 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 사업지원(KIAT) (No. RS-2025-04752996), 그리고 국립공주대학교 학술연구지원사업의 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] J. Zhao *et al.*, "Substation Reactive Power Optimization Considering Capacitor Operation Regulation Cost," in *2024 4th International Conference on Intelligent Power and Systems (ICIPS)*, pp. 59-62, 2024.
- [2] M. Schuster *et al.*, "Design of a Data Driven Reactive Power Forecasting for an Active Cross-Voltage Level Reactive Power Management," in *ETG Congress 2023*, pp. 1-6, 2023.
- [3] V. E. Sathishkumar *et al.*, "Industry Energy Consumption Prediction Using Data Mining Techniques," *International Journal of Energy, Information and Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 7-14, 2020.
- [4] 김광현, 오하령, 성영락. (2024). "전력 사용량 예측을 위한 새로운 트랜스포머 기반 모델", *전기학회논문지*, 73(12).