

Integrasi Peramalan pada Operasi Sistem Tenaga

Kuantisasi Ketidakpastian, Optimasi BESS Mikrogrid, dan Model Predictive Control

Ir. Novalio Daratha, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Bengkulu

Minggu 14 / Semester Ganjil 2026

Agenda Perkuliahan Minggu ke-14

Capaian Pembelajaran (Sub-CPMK 13)

Mahasiswa mampu memformulasikan peramalan probabilistik untuk mengkuantisasi ketidakpastian EBT, serta mengintegrasikan profil ramalan ke dalam strategi operasi sistem penyimpanan baterai (BESS) dan manajemen energi mikrogrid.

- 1 **Dari Point Forecast ke Probabilistic Forecast**
- 2 **Quantile Regression & Prediction Intervals**
- 3 **Integrasi pada Unit Commitment (UC)**
- 4 **Model Predictive Control (MPC) pada BESS**
- 5 **Studi Kasus: Peak Shaving & Arbitrase Tarif**
- 6 **Review Akhir & Pengarahan Capstone Project**

Kuantisasi Ketidakpastian: Peramalan Probabilistik

Peramalan satu titik (*Point Forecast*) tidak cukup untuk operasi grid yang aman:

Quantile Loss Function (ρ_τ)

$$\mathcal{L}_\tau(y, \hat{y}_\tau) = \max(\tau(y - \hat{y}_\tau), (1 - \tau)(\hat{y}_\tau - y)) \quad (1)$$

Pita Ketidakpastian (P10 – P90)

- $\hat{y}_{0.10}$ (P10): Skenario pesimis (radiasi surya rendah).
- $\hat{y}_{0.50}$ (P50): Skenario median paling mungkin.
- $\hat{y}_{0.90}$ (P90): Skenario optimis.

Manfaat Operasi

Menentukan cadangan putar (*Spinning Reserve*) generator secara efisien tanpa pemborosan bahan bakar fosil.

Integrasi Peramalan pada Manajemen Daya Mikrogrid

Persamaan Keseimbangan Daya

$$P_{\text{grid}}(t) = \hat{P}_{\text{load}}(t) - \hat{P}_{\text{PV}}(t) + P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{dis}}(t) \quad (2)$$

Batasan Fisik Baterai (BESS)

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{\min} &\leq \text{SoC}(t) \leq \text{SoC}_{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) &\leq P_{\text{ch}}^{\max}, \quad 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \end{aligned}$$

Fungsi Objektif Ekonomi

Meminimalkan total biaya pembelian energi listrik dari jaringan PLN dengan tarif dinamis $C(t)$:

$$\min \sum_{t=1}^{24} C(t) \cdot P_{\text{grid}}(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

Implementasi Python: Quantile Regression LightGBM

```
import lightgbm as lgb
import numpy as np

# Melatih 3 model kuantil: P10 (Bawah), P50 (Median), P90 (Atas)
models = {}
for q in [0.10, 0.50, 0.90]:
    params = {'objective': 'quantile', 'alpha': q, 'learning_rate': 0.05, 'max_depth': 6}
    models[q] = lgb.train(params, train_data, num_boost_round=300)

# Peramalan Pita Ketidakpastian 24 Jam
p10_pred = models[0.10].predict(X_test_24)
p50_pred = models[0.50].predict(X_test_24)
p90_pred = models[0.90].predict(X_test_24)

# Plot Visualisasi Pita 80% Confidence Interval (P10 - P90)
plt.fill_between(24, p10_pred, p90_pred, alpha=0.3, label='Pita Ketidakpastian 80%')
plt.plot(p50_pred, label='Median Forecast (P50)', color='blue')
plt.legend(); plt.show()
```

Roadmap Kompetensi Analisis Deret Waktu Mahasiswa Teknik Elektro:

Fase Pembelajaran	Metodologi Utama	Studi Kasus Keteknikan
Fase 1: Dasar	Dekomposisi, Uji ADF/KPSS, ACF/PACF	Analisis stabilitas sinyal gardu induk
Fase 2: Klasik	Holt-Winters, ARIMA, SARIMAX, Kalman Filter	STLF beban PLN & Denoising sensor baterai
Fase 3: Spektral	FFT, Wavelet DWT Denoising	Diagnostik getaran motor & Harmonisa kualitas daya
Fase 4: Machine Learning	XGBoost, LightGBM, TimeSeriesSplit	Rekayasa fitur kalender/suhu untuk peramalan beban
Fase 5: Deep Learning	LSTM, GRU, 1D-CNN, Attention, Autoencoder	Peramalan daya PLTS/PLTB & Deteksi pencurian listrik
Fase 6: Operasi Daya	Probabilistic Forecasting, BESS MPC	Manajemen energi mikrogrid berbasis ketidakpastian

Terima Kasih & Sukses Capstone

Sampai Jumpa di Sesi Seminar Proyek Akhir (Minggu 15) & UAS!

Laboratorium Sistem Tenaga & Komputasi Cerdas
Jurusan Teknik Elektro – Universitas Bengkulu