

Pemodelan Eksogen & Multivariat: SARIMAX & VAR

Korelasi Silang (CCF), Pengaruh Cuaca pada Beban Listrik, dan Sistem Multi-Kanal

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

Program Studi Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Bengkulu

Minggu 6 / Semester Ganjil 2026

Agenda Perkuliahan Minggu ke-6

Capaian Pembelajaran (Sub-CPMK 6)

Mahasiswa mampu mengintegrasikan variabel luar (eksogen) seperti cuaca/temperatur ke dalam model SARIMAX, menganalisis korelasi silang (CCF), serta memformulasikan sistem multivariat Vector AutoRegression (VAR).

- 1 Urgensi Variabel Eksogen di Sistem Tenaga
- 2 Fungsi Korelasi Silang (CCF)
- 3 Formulasi Model SARIMAX
- 4 Model Transfer Function dan Distributed Lag
- 5 Pengantar Vector AutoRegression (VAR)
- 6 Implementasi Python: Beban vs Suhu Udara

Mengapa Membutuhkan Variabel Eksogen (X_t)?

Faktor Fisik Pembentuk Beban Listrik

- **Temperatur Udara:** Saat cuaca panas, penggunaan AC pendingin ruangan melonjak drastis (*Cooling Degree Days*).
- **Radiasi Matahari:** Mempengaruhi keluaran daya fotovoltaik (PV) di atap gedung.
- **Kalender & Hari Libur:** Perbedaan pola hari kerja, akhir pekan, dan hari libur nasional.

Keterbatasan SARIMA Murni

SARIMA univariat hanya berasumsi bahwa masa depan dibentuk oleh masa lalu sinyal itu sendiri ($y_t = f(y_{t-k})$). Jika ada gelombang panas (*heatwave*) mendadak, SARIMA murni akan terlambat merespons.

Cross-Correlation Function (CCF)

Sebelum memasukkan variabel eksogen, kita menganalisis keterlambatan efek (*lagged relationship*) menggunakan CCF:

Definisi Matematis CCF

$$r_{xy}(k) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Interpretasi Lag Positif ($k > 0$): Perubahan suhu pada waktu t baru mempengaruhi lonjakan konsumsi beban AC pada waktu $t + k$ (efek inersia termal bangunan, misal $k = 2$ jam).

Pra-syarat Prewhitening: Kedua sinyal harus di-*prewhiten* agar korelasi tidak palsu (*spurious correlation*) akibat tren bersama.

Formulasi Matematis SARIMAX

Menggabungkan regresi linier dengan derau terstruktur SARIMA:

Persamaan SARIMAX

$$y_t = \sum_{j=1}^m \beta_j X_{j,t} + \eta_t \quad (2)$$

di mana galat η_t mengikuti proses SARIMA musiman:

$$\Phi_P(B^s)\phi_p(B)(1-B)^d(1-B^s)^D\eta_t = \Theta_Q(B^s)\theta_q(B)\epsilon_t \quad (3)$$

Keunggulan

Koefisien β_j merefleksikan elastisitas fisik: misal kenaikan 1°C suhu meningkatkan beban sebesar 15.4 MW.

Pengantar Vector AutoRegression (VAR)

Jika terdapat beberapa variabel kelistrikan yang saling mempengaruhi secara timbal balik (misal Tegangan Bus V_1, V_2, V_3 pada gardu transmisi):

Persamaan Model VAR(p)

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{c} + \mathbf{A}_1 \mathbf{Y}_{t-1} + \mathbf{A}_2 \mathbf{Y}_{t-2} + \cdots + \mathbf{A}_p \mathbf{Y}_{t-p} + \epsilon_t \quad (4)$$

di mana $\mathbf{Y}_t = [y_{1,t}, y_{2,t}, \dots, y_{k,t}]^T$ adalah vektor observasi k -dimensi, dan $\mathbf{A}_i$ adalah matriks koefisien $k \times k$.

Uji Kausalitas Granger: Menguji apakah riwayat sinyal X secara statistik membantu meramalkan sinyal Y .

Implementasi Python: SARIMAX dengan Data Suhu

```
from statsmodels.tsa.statespace.sarimax import SARIMAX
import pandas as pd

# Load data beban & temperatur
df = pd.read_csv('load_weather.csv', parse_dates=['time'], index_col='time')
train, test = df[:-24], df[-24:]

# Definisikan variabel eksogen (X: suhu, radiasi)
exog_train = train[['temperature', 'solar_irradiance']]
exog_test = test[['temperature', 'solar_irradiance']]

# Fitting Model SARIMAX(1,1,1)(1,1,0)_24
sarimax = SARIMAX(train['load_mw'], exog=exog_train,
                   order=(1, 1, 1), seasonal_order=(1, 1, 0, 24)).fit(dispatch=False)

print(sarimax.summary())

# Forecasting 24 Jam ke Depan dengan Ramalan Cuaca
pred_24 = sarimax.forecast(steps=24, exog=exog_test)
```

Implementasi Python: Vector AutoRegression (VAR)

```
from statsmodels.tsa.api import VAR
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Load dataset sistem 3-variabel (Tegangan, Arus, THD)
df_multi = pd.read_csv('power_quality.csv', index_col='time')

# Inisialisasi dan pencarian ordo optimal VAR (minimasi AIC)
model_var = VAR(df_multi)
results = model_var.fit(maxlags=15, ic='aic')
print(f"Ordo VAR terpilih: {results.k_ar}")
print(results.summary())

# Analisis Impulse Response Function (IRF)
# Melihat respon variabel lain jika ada lonjakan sesaat di 'Arus'
irf = results.irf(10) # 10 langkah ke depan
irf.plot(impulse='Arus', response='THD')
plt.title("Respon THD terhadap Impuls Arus")
plt.show()

# Peramalan sistem multivariat
forecast_var = results.forecast(df_multi.values[-results.k_ar:], steps=5)
```

Rangkuman & Persiapan Minggu ke-7

Poin Kunci Minggu 6

- SARIMAX memperluas kemampuan peramalan dengan menyerap informasi kausal fisik eksternal.
- Analisis CCF mendeteksi jeda waktu inersia termal sistem kelistrikan.
- VAR memodelkan dinamika interaksi multi-bus secara simultan tanpa asumsi searah.

Materi Minggu Depan (Minggu ke-7)

Estimasi State & Kalman Filter: Representasi ruang keadaan (*State-Space*), algoritma Discrete Kalman Filter, dan peredaman derau pengukuran sensor telemetri.

Terima Kasih

Sesi Tanya Jawab & Diskusi Model Eksogen

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