

PROBLEM SET MINGGU 11

EKONOMI OPERASI SISTEM TENAGA

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik
Fakultas Teknik - Universitas Bengkulu

Petunjuk Pengerjaan

- Problem set ini terdiri dari soal-soal dengan tingkat kesulitan bertingkat (C1-C6 Bloom's Taxonomy)
- Kerjakan soal secara sistematis dengan menunjukkan langkah-langkah penyelesaian
- Untuk soal komputasi, gunakan MATPOWER/Octave jika diperlukan
- Sertakan analisis dan interpretasi untuk soal-soal tingkat tinggi (C4-C6)

1 Level C1: Mengingat (Remember)

Soal 1.1

Definisikan istilah-istilah berikut dalam konteks ekonomi operasi sistem tenaga:

- a. Incremental cost
- b. System lambda (λ)
- c. Penalty factor
- d. Base load, intermediate load, dan peak load
- e. Locational Marginal Price (LMP)



Soal 1.2

Sebutkan tiga komponen utama dari Locational Marginal Price (LMP) dan jelaskan masing-masing secara singkat.

Soal 1.3

Tuliskan bentuk umum fungsi biaya kuadratik untuk pembangkit termal dan jelaskan makna dari setiap koefisien.



2 Level C2: Memahami (Understand)

Soal 2.1

Jelaskan mengapa prinsip "equal incremental cost" memberikan solusi optimal untuk masalah economic dispatch tanpa rugi-rugi transmisi. Gunakan penjelasan intuitif atau grafis.

Soal 2.2

Dua pembangkit memiliki incremental cost sebagai berikut:

- Pembangkit A: $IC_A = 40 + 0.04P_A$ Rp/MWh
- Pembangkit B: $IC_B = 50 + 0.02P_B$ Rp/MWh

Jika saat ini $P_A = 200$ MW dan $P_B = 200$ MW, apakah ini kondisi optimal? Jika tidak, pembangkit mana yang harus ditingkatkan outputnya? Jelaskan alasannya tanpa melakukan perhitungan lengkap.

Soal 2.3

Jelaskan mengapa penalty factor untuk pembangkit yang jauh dari pusat beban umumnya lebih besar dari 1. Apa implikasinya terhadap economic dispatch?



Soal 2.4

Gambarkan dan jelaskan kurva supply dan demand dalam pasar listrik day-ahead. Apa yang terjadi pada market clearing price jika permintaan listrik meningkat tajam?



3 Level C3: Menerapkan (Apply)

Soal 3.1

Sistem tenaga memiliki dua pembangkit dengan karakteristik:

- Pembangkit 1: $C_1 = 700 + 38P_1 + 0.018P_1^2$ Rp/jam, $80 \leq P_1 \leq 350$ MW
- Pembangkit 2: $C_2 = 550 + 48P_2 + 0.030P_2^2$ Rp/jam, $60 \leq P_2 \leq 280$ MW

Total beban yang harus dipenuhi adalah 450 MW. Abaikan rugi-rugi transmisi.

- Tentukan dispatch ekonomi optimal (P_1 , P_2 , dan λ).
- Hitung total biaya operasi per jam.
- Jika beban meningkat menjadi 500 MW, berapa dispatch yang baru?

Soal 3.2

Tiga pembangkit dengan data sebagai berikut:

Unit	a_i (Rp/jam)	b_i (Rp/MWh)	c_i (Rp/MW ² h)	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	800	32	0.012	100	500
2	650	42	0.025	80	400
3	500	55	0.040	50	250



Untuk beban total 700 MW:

- a. Hitung economic dispatch optimal.
- b. Verifikasi bahwa semua batasan kapasitas terpenuhi.
- c. Hitung total biaya dan system lambda.

**Soal 3.3**

Sistem dengan dua pembangkit memiliki rugi-rugi transmisi:

$$P_{loss} = 0.00008P_1^2 + 0.00012P_2^2 \text{ MW} \quad (1)$$

Fungsi biaya:

- $C_1 = 600 + 42P_1 + 0.022P_1^2$ Rp/jam
- $C_2 = 550 + 38P_2 + 0.018P_2^2$ Rp/jam

Untuk beban 500 MW:

- a. Hitung penalty factors jika $P_1 = 250$ MW dan $P_2 = 250$ MW.
- b. Tentukan apakah kondisi ini optimal.
- c. Lakukan satu iterasi untuk mendekati solusi optimal.

4 Level C4: Menganalisis (Analyze)**Soal 4.1**

Perhatikan data pembangkit berikut untuk sistem Bengkulu:



Pembangkit	Kapasitas (MW)	Jenis	IC @ 50% (Rp/MWh)	IC @ 100% (Rp/MWh)
PLTU Bengkulu	200	Batubara	40	46
PLTP Hululais	110	Panas bumi	28	30
PLTA Musi	210	Hidro	5	8
PLTD Backup	50	Diesel	95	115

- Analisis urutan merit (merit order) pembangkit dari yang paling ekonomis.
- Untuk kurva beban harian yang bervariasi dari 250 MW (dini hari) hingga 480 MW (sore hari), jelaskan bagaimana kombinasi pembangkit berubah sepanjang hari.
- Identifikasi periode kritis dimana PLTD mungkin perlu dioperasikan dan jelaskan implikasi biayanya.
- Bagaimana strategi dispatch akan berubah pada musim kemarau ketika kapasitas PLTA berkurang?

**Soal 4.2**

Diberikan hasil optimal power flow untuk sistem 5-bus:

Bus	LMP (Rp/MWh)	λ (Rp/MWh)	Jarak ke Slack Bus
1 (Slack)	50.0	50.0	-
2	51.2	50.0	Dekat
3	53.8	50.0	Sedang
4	52.5	50.0	Sedang
5	56.3	50.0	Jauh

- Analisis mengapa LMP berbeda untuk setiap bus meskipun λ sama.
- Bus mana yang mengalami kongesti tertinggi? Jelaskan.
- Jika akan membangun pembangkit baru 100 MW, di bus mana sebaiknya diletakkan dari sudut pandang ekonomi? Jelaskan.
- Apa yang terjadi pada LMP jika saluran antara bus 3 dan 5 mengalami outage?

Soal 4.3

Sebuah sistem memiliki dua pembangkit identik dengan $IC = 45 + 0.03P$ Rp/MWh. Namun, pembangkit 1 terletak dekat pusat beban ($L_1 = 1.02$) sedangkan pembangkit 2 jauh ($L_2 = 1.08$).

- Untuk beban 400 MW, hitung dispatch optimal dengan mempertimbangkan penalty factors.



- b. Bandingkan dengan dispatch tanpa mempertimbangkan rugi-rugi transmisi (asumsi $L_1 = L_2 = 1$).
- c. Hitung perbedaan total biaya dan rugi-rugi daya antara kedua kasus.
- d. Analisis trade-off antara biaya bahan bakar dan rugi-rugi transmisi dalam kasus ini.



5 Level C5: Mengevaluasi (Evaluate)

Soal 5.1

Provinsi Bengkulu sedang merencanakan ekspansi pembangkitan dengan dua opsi:

Opsi A: PLTU Batubara 2×100 MW

- Biaya investasi: Rp 3 triliun
- Incremental cost: 40 Rp/MWh (rata-rata)
- Lokasi: dekat pusat beban (penalty factor ≈ 1.01)

Opsi B: PLTA Cascade 150 MW

- Biaya investasi: Rp 4.5 triliun
- Incremental cost: 8 Rp/MWh (rata-rata)
- Lokasi: pegunungan, jauh dari beban (penalty factor ≈ 1.06)
- Variabel musiman (kapasitas berkurang 40% saat kemarau)

a. Evaluasi kedua opsi dari sudut pandang:

- Economic dispatch
- Total biaya operasi tahunan (asumsi capacity factor 70% untuk PLTU, 60% untuk PLTA)
- Dampak terhadap rugi-rugi sistem
- Keandalan pasokan

b. Dengan asumsi beban rata-rata Bengkulu 400 MW dan proyeksi pertumbuhan 5% per tahun, opsi mana yang lebih ekonomis dalam jangka panjang (15 tahun)?

c. Faktor-faktor non-ekonomi apa yang harus dipertimbangkan dalam keputusan ini?

d. Berikan rekomendasi Anda dengan justifikasi yang kuat.



Soal 5.2

Indonesia sedang mempertimbangkan transisi dari sistem regulated monopoly (PLN) menuju pasar listrik kompetitif.

- a. Evaluasi kelebihan dan kekurangan pasar listrik kompetitif dibanding sistem monopoli terintegrasi, khususnya dalam konteks:
 - Efisiensi operasi (economic dispatch)
 - Insentif investasi
 - Harga listrik untuk konsumen
 - Keandalan sistem
- b. Bagaimana karakteristik sistem Bengkulu (banyak energi terbarukan, beban relatif kecil, geografis tersebar) mempengaruhi kelayakan pasar listrik?
- c. Evaluasi kesiapan Bengkulu untuk mengadopsi pasar listrik. Apa tantangan utamanya?
- d. Berikan opini Anda: apakah pasar listrik cocok untuk Bengkulu dalam 10 tahun ke depan? Justifikasi jawaban Anda.



6 Level C6: Mencipta (Create)

Soal 6.1

Proyek: Desain Sistem Economic Dispatch untuk Bengkulu

Anda ditugaskan merancang sistem economic dispatch otomatis untuk koordinasi pembangkit-pembangkit di Bengkulu. Sistem harus dapat menangani:

- 7 pembangkit dengan karakteristik berbeda (PLTU, PLTP, PLTA, PLTMH, PLTD)
- Variasi beban harian (dari 250 MW hingga 500 MW)
- Variasi musiman (kapasitas PLTA berkurang saat kemarau)
- Rugi-rugi transmisi
- Batasan ramping rate (laju perubahan output pembangkit)

Tugas Anda:

- a. Kembangkan model matematis lengkap untuk masalah economic dispatch ini, termasuk:
 - Fungsi objektif
 - Semua batasan (constraints)
 - Penanganan variabel musiman
- b. Rancang algoritma solusi (bisa berbasis Lagrange, iteratif, atau optimization lainnya). Buat flowchart algoritma Anda.
- c. Implementasikan algoritma dalam Octave/MATLAB. Kode harus:
 - Menerima input data pembangkit dan beban
 - Menghitung dispatch optimal
 - Mengoutput hasil dalam format yang mudah dibaca
- d. Lakukan studi kasus untuk:
 - Hari biasa (beban normal, musim hujan)
 - Hari puncak (beban tinggi, musim hujan)
 - Musim kemarau (beban normal, PLTA terbatas)
- e. Buat laporan analisis yang mencakup:
 - Hasil dispatch untuk setiap skenario
 - Analisis sensitivitas terhadap perubahan beban dan ketersediaan pembangkit
 - Rekomendasi untuk operator sistem
 - Visualisasi (grafik dispatch, kurva biaya, dll)

Catatan: Ini adalah proyek besar. Kerjakan secara berkelompok (max 3 orang) dan presentasikan hasilnya.



Soal 6.2

Desain Strategi Integrasi Energi Terbarukan dalam Economic Dispatch

Bengkulu menargetkan 50% energi dari sumber terbarukan pada tahun 2030. Ini berarti integrasi masif PLTS, PLTMH, dan ekspansi PLTA/PLTP. Namun, energi terbarukan memiliki karakteristik:

- Intermiten (PLTS tergantung cuaca, PLTA tergantung musim)
- Biaya operasi variabel sangat rendah atau nol
- Tidak bisa di-dispatch sesuai keinginan (must-run atau curtailment)

Tugas Anda:

- a. Kembangkan framework baru untuk economic dispatch yang mengakomodasi:
 - Renewable energy prioritization
 - Forecasting uncertainty
 - Energy storage integration (jika ada)
 - Demand response programs
- b. Rancang mekanisme untuk menentukan nilai ekonomi energi terbarukan dalam dispatch, mengingat:
 - Biaya marjinal hampir nol
 - Nilai strategis (emisi, sustainability)
 - Opportunity cost (terutama untuk hidro dengan reservoir terbatas)
- c. Buat model simulasi untuk sistem Bengkulu 2030 dengan asumsi:
 - PLTS 150 MW (variabel 0-100% tergantung waktu)
 - PLTA/PLTP 400 MW (baseload)
 - PLTMH 50 MW (run-of-river, variabel musiman)
 - PLTU 200 MW (backup)
 - Battery storage 100 MW / 400 MWh
- d. Simulasikan operasi sistem selama 24 jam untuk:
 - Hari cerah
 - Hari mendung

Tunjukkan dispatch schedule, penggunaan storage, dan total biaya.

- e. Buat policy recommendation untuk pemerintah Bengkulu terkait:
 - Investasi infrastruktur pendukung (storage, grid reinforcement)
 - Regulasi dan insentif untuk renewable energy
 - Strategi operasional untuk menjaga keandalan dengan renewable tinggi



Deliverables:

- Technical report (15-20 halaman)
- Working simulation code
- Presentation slides
- Policy brief (2 halaman untuk decision makers)



Soal 6.3

Desain Mekanisme Pasar Listrik untuk Bengkulu

Bayangkan Bengkulu menjadi pilot project untuk pasar listrik regional di Indonesia. Anda ditugaskan merancang mekanisme pasar yang sesuai dengan karakteristik lokal.

Tugas Anda:

- a. Rancang struktur pasar listrik untuk Bengkulu, meliputi:
 - Jenis pasar (day-ahead, real-time, capacity, ancillary)
 - Pelaku pasar (generators, retailers, consumers)
 - Aturan bidding dan market clearing
 - Mekanisme pricing (LMP, zonal, uniform, dll)
- b. Kembangkan model market clearing algorithm yang:
 - Menerima bids dari generators dan demands dari loads
 - Menjalankan optimization (economic dispatch dengan network constraints)
 - Menentukan market clearing price dan dispatch schedule
- c. Rancang mekanisme insentif untuk:
 - Mendorong investasi di pembangkit terbarukan
 - Menjaga adequacy dan reliability
 - Melindungi konsumen dari price volatility
 - Mendorong energy efficiency
- d. Lakukan simulasi pasar dengan skenario:
 - Kompetisi sehat (banyak pemain, bids kompetitif)
 - Market power (satu generator dominan, strategic bidding)
 - Extreme event (outage pembangkit besar, demand surge)

Analisis stabilitas harga dan fairness.

- e. Buat regulatory framework yang mencakup:
 - Peran dan tanggung jawab market operator
 - Aturan anti-manipulasi pasar
 - Mekanisme penyelesaian sengketa
 - Transisi dari sistem lama ke pasar
- f. Evaluasi kelayakan ekonomi dan sosial:
 - Analisis cost-benefit
 - Dampak pada harga listrik konsumen
 - Efek pada investasi dan persaingan
 - Risiko dan mitigasi



Format Penyerahan:

- Comprehensive design document (20-30 halaman)
- Market simulation code dan hasil
- Regulatory draft (5-10 halaman)
- Executive summary untuk stakeholders (3 halaman)
- Presentasi (30 menit + Q&A)



Rubrik Penilaian

Soal C1-C3 (60%)

- Ketepatan konsep dan definisi (20%)
- Kebenaran perhitungan matematis (25%)
- Kelengkapan langkah penyelesaian (15%)

Soal C4 (15%)

- Kedalaman analisis (8%)
- Kemampuan mengidentifikasi pola dan hubungan (4%)
- Kualitas interpretasi hasil (3%)

Soal C5 (10%)

- Kemampuan evaluasi multi-kriteria (4%)
- Kualitas justifikasi dan argumen (4%)
- Pertimbangan konteks dan trade-offs (2%)

Soal C6 (15%)

- Kreativitas dan inovasi solusi (5%)
- Kelengkapan dan koherensi desain (5%)
- Implementasi dan validasi (3%)
- Kualitas presentasi dan dokumentasi (2%)

Referensi

1. Saadat, H. (2011). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
2. Wood, A. J., Wollenberg, B. F., & Sheblé, G. B. (2013). *Power Generation, Operation, and Control*. John Wiley & Sons.
3. Kirschen, D., & Strbac, G. (2018). *Fundamentals of Power System Economics*. John Wiley & Sons.
4. MATPOWER Manual: <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual.pdf>
5. Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12-19.



— SELAMAT MENGERJAKAN —

*“The art of economic dispatch lies not just in minimizing cost,
but in understanding the delicate balance between efficiency, reliability, and
sustainability.”*