

Economic Dispatch dalam Optimalisasi Biaya Operasi Sistem Tenaga Listrik Berkelanjutan

Syahrial Shaddiq¹, M. Yusri Dzal Yahya², Munfiq Rosandi Multihakiki³, Susi Apriana⁴,

Steven Kenli⁵, Ahmad Ruspandi⁶

¹ Department of Accounting and Master of Development Economics, Faculty of Economics and Business,
Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin, Indonesia

² Master of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering, Institut Teknologi
Sepuluh November, Surabaya, Indonesia

³ Master of Islamic Education, Postgraduate Program, Universitas Sunan Giri, Surabaya, Indonesia

⁴ Department of Accounting, Faculty of Economic and Business, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin,
Indonesia

⁵ Department of Accounting, Faculty of Economics and Business, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin,
Indonesia

⁶ Department of Development Economics, Faculty of Economic and Business, Universitas Lambung Mangkurat,
Banjarmasin, Indonesia

Abstrak

Economic Dispatch (ED) merupakan metode optimasi dalam sistem tenaga listrik (STL) yang digunakan untuk menentukan pembagian daya pada setiap unit pembangkit agar kebutuhan beban terpenuhi dengan biaya operasi minimum serta tetap memenuhi batasan teknis sistem. Studi ini membahas prinsip dasar ED, model matematis, metode penyelesaian klasik dan modern, serta implementasinya pada sistem tenaga berbasis energi terbarukan. Hasil kajian menunjukkan bahwa ED memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi operasi sistem tenaga listrik. Selain itu, akurasi dan kinerja ED dapat ditingkatkan melalui penerapan metode optimasi berbasis *metaheuristic*.

Kata kunci: *Economic Dispatch*, Sistem Tenaga Listrik, Optimasi, Pembangkit Listrik, *Metaheuristic*.

1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik modern membutuhkan pengelolaan operasi yang efisien agar biaya pembangkitan dapat ditekan tanpa mengorbankan keandalan dan kualitas layanan (Abido, 2018). Salah satu komponen kritis dalam manajemen operasi adalah *economic dispatch* (ED), yaitu proses menentukan *output* daya optimal dari setiap unit pembangkit untuk memenuhi permintaan beban secara ekonomis (Wood & Wollenberg, 2012).

Energi listrik saat ini sangat dibutuhkan oleh manusia dalam menjalankan pekerjaannya (Dermawan *et al.*, 2019). Namun, seiring berjalannya waktu, ditemukan permasalahan yaitu mahalnya biaya penggunaannya (Sani *et al.*, 2019). Jadi, dengan semakin tingginya kebutuhan energi listrik dan masuknya sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yang bersifat intermittent, implementasi *Economic dispatch* menjadi semakin penting untuk menjaga keseimbangan ekonomi, efisiensi, dan stabilitas sistem tenaga listrik (Grainger & Stevenson, 2016).

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Definisi *Economic Dispatch*

Economic dispatch adalah teknik optimasi dalam operasi pembangkit untuk menentukan jumlah daya yang dihasilkan oleh masing-masing unit pembangkit pada setiap interval waktu sehingga total biaya operasi minimum (Mohamed & Beige, 2019).

2.2 Fungsi Biaya Pembangkit

Fungsi biaya biasanya dimodelkan sebagai fungsi kuadrat:

$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

Penjelasan:

- $C_i(P_i)$ = Total biaya dari unit/perusahaan ke-i
- P_i = Jumlah output/produksi (atau daya pembangkitan pada sistem tenaga listrik)
- a_i = Biaya tetap (fixed cost)
- $b_i P_i$ = Komponen biaya variabel linear
- $c_i P_i^2$ = Komponen biaya variabel kuadrat (mencerminkan increasing marginal cost)

2.3 Batasan dalam *Economic Dispatch*

1. Batasan Permintaan Beban (*Load Balance Constraint*)

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_{loss}$$

Keterangan:

- P_D = Total permintaan beban (demand)
- P_{loss} = Rugi-rugi transmisi (transmission losses)
- $\sum P_i$ = Total daya pembangkit

Jika rugi-rugi diabaikan:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D$$

2. Batasan Kapasitas Unit

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}$$

Artinya:

- Tidak boleh beroperasi di bawah batas teknis minimum
- Tidak boleh melebihi kapasitas maksimum terpasang

3. *Ramp Rate Limit, Transmission Losses, dan Operational Constraints*

3.1. *Ramp Rate Limit*

Menyatakan batas perubahan daya per satuan waktu:

$$P_i(t) - P_i(t-1) \leq UR_i$$

$$P_i(t-1) - P_i(t) \leq DR_i$$

Keterangan:

- UR_i = Up Ramp Limit
- DR_i = Down Ramp Limit

Generator tidak dapat menaikkan atau menurunkan daya secara instan.

3.2. Transmission Losses

Jika rugi-rugi dihitung menggunakan *B-Coefficient (Loss Formula)*:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j$$

di mana:

- B_{ij} = Koefisien rugi-rugi transmisi

3.3. Operational Constraints

Beberapa batasan operasional lain:

- *Prohibited Operating Zones*
- *Spinning Reserve Constraint*
- *Voltage & Stability Limits*
- *Minimum Up/Down Time (pada Unit Commitment)*

Jika tidak ada rugi-rugi dan semua unit berada dalam batas normal:

$$\frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \dots = \frac{dC_n}{dP_n} = \lambda$$

Atau:

$$b_i + 2c_i P_i = \lambda$$

Ini disebut *Equal Incremental Cost Criterion*.

2.4 Metode Penyelesaian *Economic Dispatch*

Metode klasik:

- *Lambda Iteration Method*
- *Gradient Method*
- *Newton-Raphson Method*

Metode modern:

- *Genetic Algorithm* (GA)
- *Particle Swarm Optimization* (PSO)
- *Differential Evolution* (DE)
- *Artificial Bee Colony* (ABC)
- *Firefly Algorithm* (FA)

3. Metode Penelitian

Artikel ini menggunakan metode studi literatur dengan meninjau teori dan model matematis ED serta berbagai pendekatan optimasi yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya. Analisis juga dilakukan pada pengaruh integrasi pembangkit energi terbarukan terhadap performa ED (Kavousi-Fard *et al.* 2020).

4. Pembahasan

Economic dispatch merupakan salah satu metode optimasi yang sangat penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik modern. Tujuan utama dari metode ini adalah menentukan pembagian daya listrik yang harus dihasilkan oleh setiap unit pembangkit sehingga kebutuhan beban sistem dapat terpenuhi dengan biaya operasi minimum, tanpa melanggar batasan teknis dari masing-masing unit pembangkit.

Dalam sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa generator, setiap unit memiliki karakteristik fungsi biaya yang berbeda sehingga diperlukan suatu mekanisme optimasi untuk menentukan kombinasi pembangkitan yang paling efisien.

4.1 Prinsip Kerja *Economic Dispatch*

ED bekerja berdasarkan prinsip bahwa biaya marjinal setiap pembangkit harus sama pada kondisi optimum:

$$\frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \dots = \frac{dC_n}{dP_n} = \lambda$$

Parameter λ (lambda) mewakili *incremental cost* yang merata di seluruh pembangkit.

Prinsip dasar *economic dispatch* didasarkan pada konsep biaya marjinal (*incremental cost*) dari setiap unit pembangkit. Pada kondisi optimal, nilai *incremental cost* dari seluruh unit pembangkit harus sama. Kondisi ini dikenal sebagai *equal incremental cost criterion*, yang menyatakan bahwa distribusi daya akan mencapai biaya minimum apabila tambahan biaya untuk menghasilkan satu unit daya tambahan pada setiap generator bernilai sama.

Dalam praktiknya, setiap generator memiliki fungsi biaya yang biasanya berbentuk fungsi kuadrat terhadap daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, perhitungan ED melibatkan

proses optimasi matematis untuk menentukan besarnya daya yang harus dihasilkan oleh masing-masing generator agar total biaya sistem menjadi minimum. Parameter λ (*lambda*) dalam model ED berfungsi sebagai koefisien biaya marjinal sistem, yang menunjukkan besarnya biaya tambahan untuk memenuhi peningkatan permintaan daya.

4.2 Pengaruh *Transmission Losses*

Jika rugi transmisi P_{loss} diperhitungkan, persamaan ED berubah menjadi:

$$\frac{dC_i}{dP_i} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} \right)$$

Turunan parsial terhadap P_i :

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^n B_{ij} P_j$$

Kondisi optimal:

Substitusi ke persamaan utama:

$$b_i + 2c_i P_i = \lambda \left(1 - 2 \sum_{j=1}^n B_{ij} P_j \right)$$

Bentuk alternatif (*loss penalty factor*), persamaan sering ditulis sebagai:

$$\frac{dC_i}{dP_i} \times L_i = \lambda$$

dengan:

$$L_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i}}$$

L_i disebut *Penalty Factor*.

Makna fisik:

- Tanpa losses \rightarrow semua incremental cost sama.
- Dengan losses \rightarrow incremental cost dikoreksi oleh faktor penalti.

- Generator yang lokasinya menyebabkan rugi-rugi besar akan memiliki *penalty factor* lebih tinggi.

Pada sistem tenaga listrik nyata, proses penyaluran energi dari pembangkit ke beban tidak terlepas dari adanya rugi-rugi transmisi (*transmission losses*). Kehilangan daya ini terjadi karena adanya resistansi pada jaringan transmisi sehingga sebagian energi listrik berubah menjadi panas. Jika rugi-rugi transmisi diperhitungkan dalam model *economic dispatch*, maka proses optimasi menjadi lebih kompleks karena daya yang dihasilkan pembangkit tidak sepenuhnya sampai ke beban.

Untuk mengatasi hal tersebut digunakan pendekatan *penalty factor*, yaitu faktor koreksi yang menunjukkan besarnya pengaruh rugi-rugi transmisi terhadap kontribusi daya dari suatu generator. Generator yang lokasinya lebih jauh dari pusat beban atau berada pada jaringan dengan rugi-rugi lebih besar akan memiliki nilai *penalty factor* yang lebih tinggi. Akibatnya, generator tersebut cenderung menghasilkan daya lebih sedikit dibandingkan generator yang memiliki rugi transmisi lebih kecil. Dengan mempertimbangkan faktor ini, proses optimasi dapat menghasilkan pembagian daya yang lebih realistis dan efisien.

Interpretasi ekonomi:

λ (*lambda*) sekarang menjadi:

Biaya marjinal sistem yang sudah memperhitungkan dampak rugi-rugi trans. Inilah yang menyebabkan optimalisasi ED semakin kompleks.

4.3 *Economic Dispatch* dengan Energi Terbarukan

Integrasi pembangkit tenaga surya dan angin menambah ketidakpastian karena daya *output*-nya dipengaruhi kondisi alam. ED pada sistem hibrida perlu memasukkan:

- Variabilitas daya
- Probabilistic forecasting
- Optimasi berbasis skenario

Pendekatan metaheuristik terbukti lebih handal dalam kasus ini dibanding metode deterministik klasik karena dapat mengakomodasi *non-convex cost functions* serta *multiple minima*.

Perkembangan teknologi energi terbarukan seperti pembangkit tenaga surya dan angin membawa tantangan baru dalam penerapan *economic dispatch*. Berbeda dengan pembangkit konvensional yang dapat dikendalikan secara langsung, pembangkit energi terbarukan bersifat intermiten, yaitu *output* dayanya bergantung pada kondisi alam seperti intensitas matahari dan kecepatan angin. Kondisi ini menyebabkan ketidakpastian dalam perencanaan operasi sistem tenaga listrik.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, model ED modern mulai mengintegrasikan pendekatan *probabilistic forecasting* dan optimasi berbasis skenario. Metode ini memungkinkan operator sistem memperkirakan variasi daya dari sumber energi terbarukan dan menyesuaikan

distribusi pembangkitan dari unit konvensional agar sistem tetap stabil. Dengan demikian, integrasi energi terbarukan tidak hanya meningkatkan keberlanjutan energi tetapi juga menuntut metode optimasi yang lebih adaptif.

4.4 Perbandingan Metode Klasik vs Metaheuristik

Aspek	Metode Klasik	Metaheuristik
Kecepatan	Cepat pada fungsi konveks	Lebih lambat
Kompleksitas	Terbatas untuk fungsi linier/kuadratik	Fleksibel untuk <i>multi-constraint</i>
Akurasi	Renta lokal optimum	Global optimum lebih mudah dicapai
Energi Terbarukan	Kurang cocok	Sangat cocok

Dalam penyelesaian masalah *economic dispatch*, terdapat dua pendekatan utama yaitu metode klasik dan metode metaheuristik. Metode klasik seperti *Lambda Iteration*, *Gradient Method*, dan *Newton-Raphson* biasanya digunakan pada sistem dengan fungsi biaya yang konveks dan jumlah batasan yang relatif sederhana. Metode ini memiliki keunggulan dari segi kecepatan komputasi dan kemudahan implementasi.

Namun, pada sistem tenaga listrik modern yang memiliki banyak batasan operasional serta integrasi energi terbarukan, fungsi biaya seringkali bersifat non-linier dan non-konveks. Dalam kondisi tersebut, metode metaheuristik seperti *genetic algorithm* (GA), *particle swarm optimization* (PSO), *differential evolution* (DE), *artificial bee colony* (ABC), dan *firefly algorithm* (FA) menjadi alternatif yang lebih efektif. Metode ini mampu mencari solusi global secara lebih fleksibel meskipun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama.

Secara keseluruhan, pemilihan metode penyelesaian ED sangat bergantung pada kompleksitas sistem tenaga listrik yang dianalisis. Untuk sistem sederhana, metode klasik masih cukup efektif. Namun untuk sistem modern yang melibatkan banyak pembangkit dan sumber energi terbarukan, pendekatan metaheuristik memberikan hasil optimasi yang lebih akurat dan adaptif.

5. Kesimpulan

Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa *economic dispatch* merupakan alat penting dalam optimasi operasi pembangkit tenaga listrik untuk meminimalkan biaya total dengan mempertimbangkan batasan teknis sistem. Metode klasik sangat efektif untuk sistem tanpa rugi transmisi dan fungsi biaya konveks. Namun, dengan berkembangnya teknologi pembangkit energi terbarukan dan meningkatnya kompleksitas sistem tenaga, penggunaan metode optimasi metaheuristik pada analisis *economic dispatch* menjadi alternatif yang lebih adaptif, akurat, fleksibel, dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Abido, M. (2018). "Optimization Techniques for ED Problems." *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Dermawan, E., Chamdareno, P. G., & Priyono, A. R. (2019). Studi Analisa *Start-Up* Gas Turbin Memanfaatkan Generator Utama sebagai Motor Penggerak Mula dengan Menggunakan *Static Frequency Converter* (SFC) pada Unit Blok 1-2 PT. PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar. *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 2(2), 83–88.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (2016). *Power System Analysis*.
- Kavousi-Fard, A., et al. (2020). "Hybrid Renewable Systems and Economic Dispatch." *Applied Energy*.
- Kieso, D. E. (2017). *Intermediate Accounting*. John Wiley & Sons.
- Mohamed, A., & Beig, A. R. (2019). "Economic Dispatch Using Particle Swarm Optimization." *Electric Power Systems Research*.
- Sani, A., Ferdiansyah, J., Sudarsono, B. G., & Yuniarto, D. (2019). Penerapan Metode *Forward Chaining* dengan *Case-based Reasoning* pada Kerusakan Komputer. *Applied Information System and Management (AISM)*, 2(1), 28–32.
- Warren, C. S. (2018). *Survey of Accounting*. Cengage Learning.
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (2012). *Power Generation, Operation, and Control*.