

Dynamic Economic Dispatch Menggunakan Quadratic Programming

Zainal Abidin, Imam Robandi, Rony Seto Wibowo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: robandi@ee.its.ac.id

Abstract - Dynamic economic dispatch (DED) merupakan pengembangan dari economic dispatch konvensional karena memperhitungkan parameter ramp rate unit pembangkit. DED digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan unit pembangkit secara ekonomis dalam rentang waktu tertentu tanpa melanggar parameter ramp rate unit pembangkit. Pada jurnal ini digunakan quadratic programming untuk menyelesaikan dynamic economic dispatch. Hasil simulasi menunjukkan bahwa quadratic programming dapat menyelesaikan DED tanpa melanggar parameter ramp rate yang ditentukan. Pada percobaan dengan 3-unit pembangkit pada 2 profil beban berbeda menunjukkan bahwa parameter ramp rate menyebabkan pembagian pembebanan pada satu waktu tertentu akan mempengaruhi pembagian pembebanan pada waktu lain serta terdapat variasi pembangkitan yang berbeda antara economic dispatch dan dynamic economic dispatch. Parameter ramp rate juga menyebabkan total biaya pembangkitan pada dynamic economic dispatch menjadi lebih mahal jika dibandingkan dengan economic dispatch.

Kata Kunci - dynamic economic dispatch, ramp rate, economic dispatch.

I. PENDAHULUAN

TENAGA listrik merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Permintaan daya listrik yang terus bertambah menyebabkan daya listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar. Sumber energi yang dapat diperbaharui serta ekonomi energi listrik adalah faktor penentu perkembangan industri yang bisa meningkatkan standar hidup masyarakat. Sejak revolusi industri, kebutuhan energi listrik meningkat tajam [1]. Kebutuhan tenaga listrik semakin bertambah sejalan dengan peningkatan populasi penduduk dan peningkatan pembangunan infrastruktur. Selain itu kemajuan dan perkembangan teknologi juga memberikan kontribusi besar dalam peningkatan kebutuhan tenaga listrik. Peningkatan kebutuhan tenaga listrik tidak bisa secara langsung diatasi melalui penambahan jumlah pembangkit listrik (power plant). Oleh karena itu, para produsen tenaga listrik harus mengelola pembangkitan dengan bijak supaya semua beban dapat terpenuhi dan para produsen tenaga listrik tidak mengalami kerugian akibat biaya operasional yang sangat besar.

Economic dispatch (ED) merupakan hal penting dalam kontrol dan operasi pada sistem tenaga [2]. Fungsi utama dari ED adalah untuk menjadwalkan pembangkitan dari setiap pembangkit yang beroperasi untuk dapat memenuhi kebutuhan

beban pada biaya pembangkitan paling minimal [3]. Untuk mempertahankan life time dari pembangkit dan peralatan pendukung pembangkit, thermal gradient dipertahankan pada batasan aman [4]. Parameter mekanis tersebut diterjemahkan sebagai batas dari laju perubahan daya output atau biasa disebut ramp rate [4]. ED konvensional hanya dapat digunakan untuk satu level beban [5]. Jika digunakan pada sistem dengan beban dalam rentang waktu tertentu akan ada beberapa generator yang menyalahi parameter ramp rate dari generator. Dengan parameter ramp rate, ED tidak dapat diselesaikan pada satu level beban [4].

Dynamic economic dispatch (DED) adalah masalah real time dari sistem tenaga [6]. DED merupakan pengembangan dari ED konvensional karena memperhitungkan batasan ramp rate dari unit pembangkit [4]. DED digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan unit pembangkit secara ekonomis dalam rentang waktu tertentu tanpa melanggar batasan ramp rate dari unit pembangkit. Parameter ramp rate menyebabkan pembagian pembebanan pada satu waktu tertentu akan mempengaruhi pembagian pembebanan pada waktu lain [7]. Pada jurnal ini akan digunakan quadratic programming untuk menyelesaikan permasalahan dynamic economic dispatch secara optimal.

II. DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH

A. Dynamic Economic Dispatch (DED)

Economic Dispatch (ED) adalah pembagian daya yang harus dibangkitkan oleh generator dalam suatu sistem tenaga listrik sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum. Penentuan daya output pada setiap generator hanya boleh bervariasi pada batas-batas (constraint) tertentu. Cost function dari i -unit generator dimodelkan dengan persamaan :

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

P_i adalah daya keluaran dari unit ke- i dan a_i , b_i dan c_i adalah cost coefficient unit generator ke- i . Masalah tersebut adalah memperluas zona waktu dari multiple intervals pada DED. Fungsi objektif pada permasalahan DED adalah :

$$\text{minimize } C = \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^N F_i(P_{it}) \quad (2)$$

Tujuan *DED* adalah untuk meminimalkan biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit selama T – interval waktu, dengan T adalah T_{zone} dalam waktu diskrit. P_{it} adalah daya keluaran dari unit generator ke- i pada waktu- t .

Biaya diminimalkan melalui batasan :

(1) *Real power balance*

$$\sum_{i=1}^N P_{it} = P_{Dt} \quad (3)$$

P_{Dt} adalah beban saat waktu- t

(2) *Capacity constraint*

$$P_i \leq P_{it} \leq \bar{P}_i \quad (4)$$

P_i dan \bar{P}_i merupakan kapasitas pembangkitan minimum dan maksimum dari generator unit ke- i .

(3) *Ramp constraint*

$$-\delta_i \leq P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \quad (5)$$

δ adalah *ramp limit* dari generator- i .

B. *Quadratic Programming*

Quadratic programming dapat ditulis sebagai :

$$F(x) = a + c^T x + \frac{1}{2} x^T Q x \quad (6)$$

Sesuai dengan *constraint* sistem linier

$$A_{eq} x = beq \quad (7)$$

$$A x \leq b \quad (8)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (9)$$

Q , A dan A_{eq} merupakan matrik, sedangkan f , b , beq , lb , ub dan x adalah vektor. *Economic dispatch* merupakan permasalahan optimisasi, Q harus *semi-definite*. Ini menjamin jika minimum yang didapat akan berubah menjadi *global minimum*.

III. PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING PADA DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH

A. *Inisialisasi permasalahan dynamic economic dispatch Cost function* sebagai persamaan kuadrat

$$F_i(P_i) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (10)$$

B. *Pembentukan Matrik H Simetris yang Menyatakan Bentuk Kuadrat dari Persamaan.*

Matrik dimanipulasi menjadi matrik $[1 : m \times n]$ dengan m adalah banyak jumlah beban dalam satuan waktu dan n adalah jumlah generator. Misal untuk $m = 2$, maka matrik menjadi

$$[a_1 \dots a_n \ a_1 \dots a_n] \quad (11)$$

$$H = 2 * \text{diag}[a_1 \dots a_n \ a_1 \dots a_n] \quad (12)$$

$$H = 2 * \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

C. *Pembentukan Vektor F Linier yang Menyatakan Bentuk Linear dari Cost Function*

Matrik dimanipulasi menjadi matrik $[1 : m \times n]$. Maka matrik menjadi,

$$F = [b_1 \dots b_n \ b_1 \dots b_n] \quad (14)$$

D. *Pembentukan Matrik A dan vektor b pada Constraints*

$$A * x \leq b$$

Sesuai dengan *inequality constraint* dari permasalahan *dynamic economic dispatch* persamaan (5), dapat ditulis

$$P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \quad (15)$$

$$P_{it} - P_{i(t+1)} \leq \delta_i \quad (16)$$

diperlukan matrik $A = [2 \times ((m \times n) - n) : (m - 1) \times n]$, matrik $b = [1 : ((m - 1) \times 2) \times n]$, misal $n = 3$ dan $m = 2$ maka matrik menjadi

$$A * x \leq b \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

x_1 adalah total pembangkitan generator pertama pada jam ke-1, x_4 adalah total pembangkitan generator pertama pada jam ke-2. Berdasarkan matrik *inequality constraint* pada persamaan (18) diatas didapat :

$$x_1 - x_4 \leq \delta_1 \quad (19)$$

$$x_2 - x_5 \leq \delta_2 \quad (20)$$

$$x_3 - x_6 \leq \delta_3 \quad (21)$$

$$x_4 - x_3 \leq \delta_1 \quad (22)$$

$$x_5 - x_2 \leq \delta_2 \quad (23)$$

$$x_6 - x_1 \leq \delta_3 \quad (24)$$

E. *Pembentukan Matrik Aeq dan vektor Beq pada Equality Constraints Aeq * x = beq*

Equality constraint dari permasalahan *dynamic economic dispatch* pada persamaan (3) dapat juga ditulis

$$P_{beban} = P_1 + P_2 \dots P_n \quad (25)$$

Diperlukan matrik $A_{eq} [m : (m - 1) \times n]$ dan $Beq [1 : m]$ untuk menyatakan *equality constraint* diatas. misal $n = 3$ dan $m = 2$ maka matrik menjadi

$$Aeq = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Beq = [P_{beban(1)} \ P_{beban(2)}] \quad (27)$$

$$Aeq * x = beq \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{beban(1)} \\ P_{beban(2)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Berdasarkan matrik equality constraint diatas didapat :

$$x_1 + x_2 + x_3 = P_{beban(1)} \quad (30)$$

$$x_4 + x_5 + x_6 = P_{beban(2)} \quad (31)$$

F. Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Permasalahan

Diperlukan matrik ub [1 : m x n] dan matrik lb[1 : m x n] untuk memenuhi inequality constraint dari dynamic economic dispatch. misal n = 3 dan m = 2. Maka

$$ub = [P_{max} \ P_{max} \ P_{max} \ P_{max} \ P_{max} \ P_{max}] \quad (32)$$

$$lb = [P_{min} \ P_{min} \ P_{min} \ P_{min} \ P_{min} \ P_{min}] \quad (33)$$

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Sistem Dengan 3 Unit Pembangkit

Data yang digunakan untuk simulasi dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2. Profil beban yang digunakan mewakili tipikal beban harian pada sore hari dimana beban menurun tajam lalu naik kembali. 4 profil beban yang dipakai masing masing memiliki laju penurunan dan kenaikan daya yang berbeda. profil 1 sebesar 50 MW/jam dan profil 2 sebesar 60 MW/jam [2].

a) Profil Beban 1

Pada gambar 1, unit 1, unit 2 dan unit 3 pada perhitungan ED terjadi perubahan pembangkitan daya yang cukup besar. Pada jam ke-1 ke jam ke-2 terjadi perubahan daya sebesar 50 MW dari unit 1, hal tersebut tidak sesuai dengan ramp rate unit 1 sebesar 35 MW/ jam. Pada jam ke-6, unit 2 juga mengalami perubahan daya sebesar 50 MW yang juga tidak sesuai dengan constraint ramp rate dari unit 2 sebesar 15 MW/jam. Sedangkan pada DED tidak ada satupun pembangkit yang membangkitkan daya melewati batasan ramp rate yang ada seperti terlihat pada gambar 2.

b) Profil Beban 2

Pada gambar 3, unit 1, unit 2 dan unit 3 pada perhitungan ED terjadi perubahan pembangkitan daya yang cukup besar. pada jam ke-2 ke jam ke-3 terjadi perubahan daya sebesar 60 MW dari unit 1, hal tersebut tidak sesuai dengan ramp rate unit 1 sebesar 35 MW/ jam. Pada jam ke-6, unit 2 juga

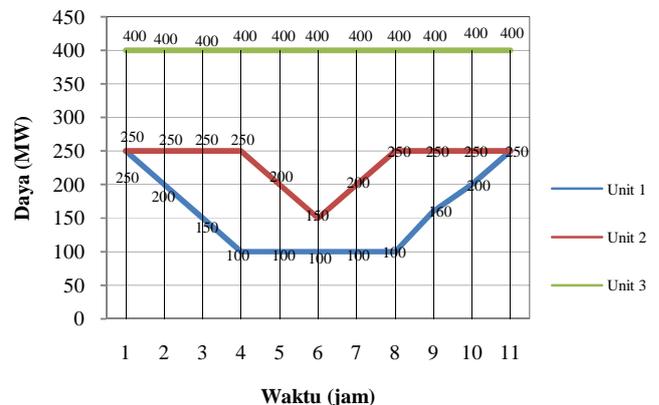
mengalami perubahan daya sebesar 60 MW yang juga tidak sesuai dengan constraint ramp rate dari unit 2 sebesar 15 MW/jam. Sedangkan pada perhitungan dynamic economic dispatch dapat diamati bahwa tidak ada satupun pembangkit yang membangkitkan daya melewati batasan ramp rate yang ada seperti terlihat pada gambar 4.

Tabel 1. Data pembangkit pada sistem dengan 3-unit pembangkit [2].

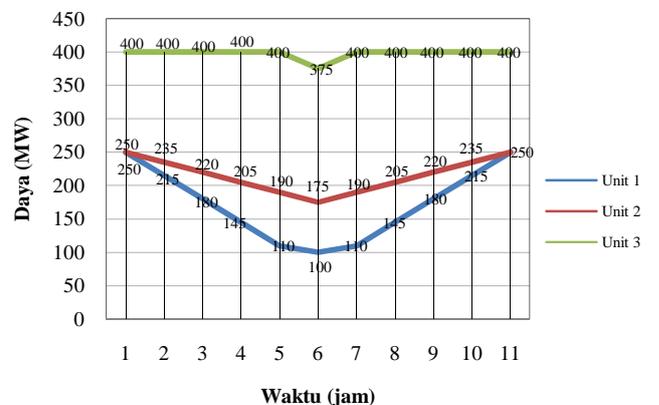
Pembangkit	Cost function (R/MWh)	Minimum output (MW)	Maximum output (MW)	Ramp rate (MW/jam)
Unit 1	$0.0020 P_{1,t}^2 + 7.5 P_{1,t} + 15$	100	300	35
Unit 2	$0.0015 P_{2,t}^2 + 5.0 P_{2,t} + 10$	50	250	15
Unit 3	$0.0010 P_{3,t}^2 + 2.5 P_{3,t} + 5$	200	400	25

Tabel 2. Data profil beban untuk simulasi sistem dengan 3 unit pembangkit

Profil beban	Beban (MW) pada jam ke -										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Profil 1	900	850	800	750	700	650	700	750	800	850	900
Profil 2	900	840	780	720	660	600	660	720	780	840	900



Gambar. 1. Grafik pembangkitan economic dispatch untuk profil beban 1.

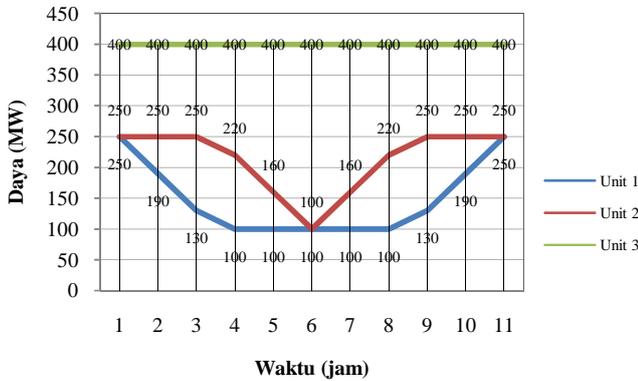


Gambar. 2. Grafik pembangkitan dynamic economic dispatch untuk profil beban 1.

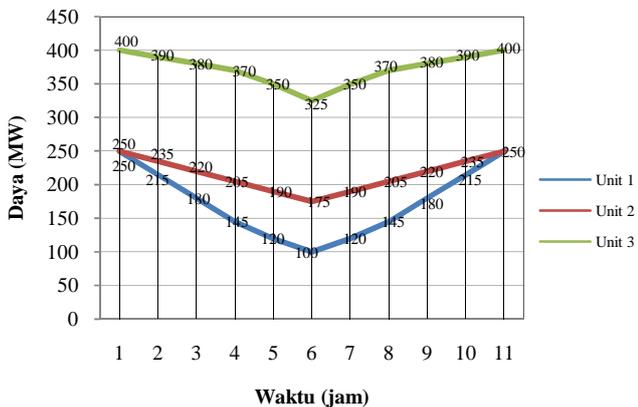
Tabel 3.

Grafik perbandingan biaya pembangkitan untuk profil beban 1.

Metode perhitungan	Biaya pembangkitan (\$)
Economic dispatch	40.094
Dynamic economic dispatch	40.629



Gambar 3. Grafik pembangkitan *economic dispatch* untuk profil beban 2.



Gambar 4. Grafik pembangkitan *dynamic economic dispatch* untuk profil beban 2.

Tabel 4.

Grafik perbandingan biaya pembangkitan untuk profil beban 2.

Metode perhitungan	Biaya pembangkitan (\$)
Economic dispatch	38.552
Dynamic economic dispatch	39.910

Pada total biaya pembangkitan terdapat perbedaan sebesar 1.358 \$. Hal tersebut disebabkan karena ada *constraint ramp rate* yang mengakibatkan variasi pembangkitan yang berbeda antara *ED* dan *DED*. Selain itu, perubahan daya beban yang sangat mendekati *ramp rate* total pembangkit juga menjadi faktor penyebab perbedaan yang signifikan dalam hal daya pembangkitan dan biaya total pembangkitan. Maka dapat disimpulkan bahwa metode *economic dispatch* yang konvensional dan bersifat statis tidak dapat diaplikasikan untuk melakukan perhitungan penjadwalan pembangkit jika ada *constraint ramp rate*. Sedangkan *dynamic economic dispatch* dengan *quadratic programming* dapat melakukan perhitungan tersebut.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Quadratic programming yang digunakan dapat melakukan perhitungan *economic dispatch* dengan akurat. *Economic dispatch* konvensional yang bersifat statis tidak dapat digunakan untuk melakukan perhitungan penjadwalan pembangkitan dalam rentang waktu tertentu jika ada parameter *ramp rate* dari unit pembangkit. Sedangkan program *dynamic economic dispatch* dengan *quadratic programming* dapat melakukan perhitungan penjadwalan pembangkitan dalam rentang waktu tertentu tanpa melanggar parameter *ramp rate* dari masing-masing unit pembangkit. *Ramp rate* sangat berpengaruh terhadap daya terbangkit pada setiap unit pembangkit karena daya yang terbangkit pada satu waktu akan mempengaruhi daya terbangkit pada waktu yang lain. Parameter *ramp rate* juga menyebabkan variasi daya pembangkitan yang lebih ketat daripada *economic dispatch* konvensional sehingga menyebabkan *dynamic economic dispatch* menghasilkan biaya total pembangkitan lebih mahal jika dibandingkan dengan *economic dispatch* konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "Modern Power System Control", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [2] Naoto Yorino, Hafiz Mohd Habibuddin, Zoka Yoshifumi, Sasaki Yutaka, Ohnishi Yuji, "Dynamic Economic Dispatch with Generator's Feasible Operatoin Region", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 10.1109/APPEEC.2010.5448180, 2010.
- [3] D. W. Ross, S. Kim, "Dynamic Economic Dispatch of Generation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 6, pp. 2060-2068, Nov. 1980.
- [4] X. S. Han, H. B. Gooi, D. S. Kirschen, "Dynamic Economic Dispatch : Feasible and Optimal Solutions", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16, no. 1, pp. 22-28, Feb. 2001.
- [5] C. B. Somuah, N. Khunaizi, "Application of Linear Programming Redispatch Technique to Dynamic Generation Allocation", IEEE Trans. on Poer Systems, vol. 5, No. 1, February 1990.
- [6] C. Kumar, T. Alwarsamy, "Dynamic Economic Dispatch – A Review of Solution Methodologies", European Journal of Scientific Research, vol. 64, no. 4, pp. 517-537, 2011.
- [7] Travers Dean L., Kaye R. John, "Dynamic Dispatch by Constructive Dynamic Programming", IEEE Trans. on Power Systems, vol.13, no. 1, pp. 72-78, February 1998.