

Dynamic Economic Dispatch dengan Mempertimbangkan Kerugian Transmisi Menggunakan Metode *Sequential Quadratic Programming*

Dika Lazuardi Akbar, Ontoseno Penangsang, Ni Ketut Aryani.

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: dikalazuardi@gmail.com, ontosenop@ee.its.ac.id, ketut.aryani@gmail.com

Abstrak — *Economic dispatch* (ED) merupakan hal penting dalam kontrol dan operasi pada sistem tenaga. Fungsi utama dari ED adalah untuk menjadwalkan pembangkitan dari setiap pembangkit yang beroperasi untuk dapat memenuhi kebutuhan beban pada biaya pembangkitan paling minimal. ED konvensional hanya dapat digunakan untuk satu level beban. *Dynamic economic dispatch* (DED) adalah perubahan beban secara *real time* pada sistem tenaga. DED merupakan pengembangan dari ED konvensional yang melibatkan *ramp rate* (batasan laju daya tiap interval). Parameter yang akan dipertimbangkan adalah kerugian transmisi dan *ramp rate*. Empat kasus pengujian akan dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh dari kerugian transmisi pada penerapan *dynamic economic dispatch*. Sistem tenaga listrik 5 bus dan sistem tenaga listrik IEEE 26 bus adalah dua *plant* yang akan digunakan untuk melakukan penerapan dari *dynamic economic dispatch*. Simulasi *dynamic economic dispatch* akan dilakukan menggunakan metode *sequential quadratic program* dimana metode tersebut merupakan pengembangan dari *quadratic programming*. Hasilnya, penerapan *dynamic economic dispatch* menunjukkan total biaya yang paling mahal adalah ketika terdapat kerugian transmisi dan parameter *ramp rate* dilanggar, total biaya menjadi tidak ekonomis dan daya yang dibangkitkan tiap unit menjadi lebih besar.

Kata Kunci— *Dynamic Economic Dispatch*, Kerugian Transmisi, *ramp rate*, *Sequential Quadratic Programming*.

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 adalah faktor penentu perkembangan industri yang bisa meningkatkan standar hidup masyarakat. Selain itu kemajuan dan perkembangan teknologi juga memberikan kontribusi besar dalam peningkatan kebutuhan tenaga listrik. Peningkatan energi listrik dari sisi pemakaian akan menjadi kendala pada sisi pembangkitan, karena pembangkit-pembangkit tenaga listrik di Indonesia relatif terbatas dan energi listrik yang dibangkitkan belum sebanding dengan kebutuhan listrik masyarakat dan Industri yang terus berkembang secara pesat sehingga suplai tenaga listrik menjadi kebutuhan utama. Perencanaan, pengelolaan pembangkitan, penyaluran dan

pendistribusian energi listrik dituntut untuk memenuhi tuntutan konsumen terhadap peningkatan kuantitas dan kualitas energi yang dihasilkan. Peningkatan kualitas energi listrik juga sangat berpengaruh dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Pengoptimalan *scheduling* generator dalam sistem tenaga listrik sangat diperlukan, karena proses pembangkitan dan penyaluran dalam sistem tenaga listrik memerlukan biaya yang sangat besar. Koordinasi antar pembangkitan diperlukan dalam upaya melakukan optimalisasi *scheduling* generator untuk memperoleh biaya yang minimum.

Dynamic economic dispatch (DED) adalah perubahan beban secara *real time* pada sistem tenaga. DED merupakan pengembangan dari ED konvensional yang melibatkan parameter *ramp rate*. DED digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan unit pembangkit secara ekonomis dalam rentang waktu tertentu dari unit pembangkit. Parameter yang akan dipertimbangkan adalah kerugian transmisi. Pada kenyataannya, penyaluran daya menuju beban selalu menimbulkan kerugian transmisi pada saluran, karena itu, kerugian transmisi perlu untuk diperhitungkan agar generator dapat membangkitkan daya yang dapat memenuhi kebutuhan beban dengan mempertimbangkan kerugian transmisi.

Aliran Daya Optimal atau *Optimal Power Flow* (OPF) merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik dan rugi-rugi pada saluran transmisi dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Pada *optimal power flow*, saat beban ringan, pembangkit termurah selalu menjadi pilihan pertama. Jika beban naik, pembangkit yang lebih mahal yang kemudian akan dimasukkan. Jadi biaya pembangkitan sangat penting dalam penyelesaian OPF.

Pada tugas akhir ini, digunakan metode *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan perhitungan *dynamic economic dispatch* dengan mempertimbangkan kerugian transmisi. Sistem tenaga listrik yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Sistem 5 bus dan IEEE 26 bus.

II. DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH

A. Economic Dispatch (ED)

Economic dispatch (ED) adalah pembagian pembebanan daya pada unit-unit generator dalam sistem tenaga listrik secara optimal dengan biaya pembangkitan yang minimal (ekonomis) [1]. Biaya yang ekonomis dalam economic dispatch ini melibatkan biaya bahan bakar (fuel cost) dan setiap pembangkit memiliki karakteristik biaya bahan bakar yang berbeda-beda tergantung dari jenis bahan bakar dan efisiensi dari pembangkit. Penyelesaian masalah operasi ekonomis pembangkit dalam sistem tenaga listrik yaitu menentukan unit-unit pembangkit untuk mensuplai kebutuhan beban dengan biaya yang optimum dengan memperhatikan batas-batas daya yang dibangkitkan.

Karakteristik input-output pembangkit adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (Mbtu/h) dan output yang dihasilkan pembangkit adalah daya dalam bentuk MW. Bentuk dari persamaan biaya pembangkit adalah persamaan polinomial orde dua yaitu :

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \tag{1}$$

$$P_{gi} \min \leq P_g \leq P_{gi} \max \tag{2}$$

Dimana :

F_i = Besar biaya pembangkitan (\$/h)

P_i = Daya output dari pembangkit ke-i (MW)

a_i, b_i, c_i = Koefisien biaya dari pembangkit ke-i

P_g = Besar daya yang dibangkitkan generator

Dari persamaan (2), ED maupun DED memiliki batasan yang harus dipenuhi. Pembangkitan generator memiliki batasan minimal dan maksimal, jika persamaan (2) tidak dipenuhi maka total biaya pembangkitan tidak akan ekonomis.

B. Dynamic Economic Dispatch (DED)

DED merupakan pengembangan dari ED dimana DED melakukan perhitungan secara real time dalam rentang waktu yang ditentukan (24 jam misalnya) [2]. Persamaan dasar untuk mendapatkan biaya pembangkitan sama dengan ED (1) namun, karena DED melakukan perhitungan secara real time (24 jam) maka persamaan biayanya dimodifikasi menjadi :

$$F_i^t(P_i^t) = a_i P_i^t{}^2 + b_i P_i^t + c_i \tag{3}$$

$$-\delta \leq P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \tag{4}$$

Dimana P_i^t adalah daya yang dibangkitkan dari unit ke-i dalam waktu t. δ adalah ramp up dan ramp down. Fungsi objektif tersebut akan meminimalkan biaya yang dibutuhkan oleh masing-masing pembangkit. Berbeda dengan ED biasa, DED (dynamic economic dispatch) memiliki batasan yang disebut ramp rate. Ramp rate adalah laju perubahan daya dari suatu unit generator dalam jam berikutnya. Pembangkitan pada interval berikutnya, tidak diperbolehkan unit generator membangkitkan atau menurunkan daya sesuai nilai dari ramp rate. Nilai dari ramp rate terbagi menjadi dua, yaitu ramp up dan ramp down. Pada tugas akhir ini nilai dari ramp rate diasumsikan pada nilai yang konstan [3].

C. Rugi-Rugi Transmisi

Daya listrik yang dikirim dan disalurkan dari pembangkit menuju konsumen (beban) mengalami rugi tegangan dan rugi daya, ini disebabkan karena saluran distribusi mempunyai tahanan, induktansi, dan kapasitas. Besarnya rugi-rugi daya unuk satu phasa adalah :

$$P_L = I^2 Z \tag{5}$$

Dimana :

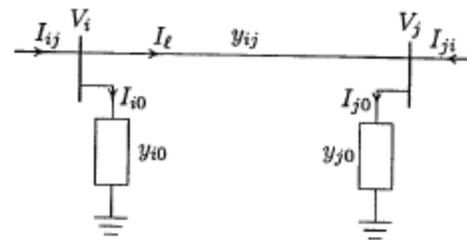
I = Arus yang mengalir pada jala-jala transmisi (ampere)

Z = Tahanan kawat transmisi arus bolak balik

Dan untuk tiga phasa, rugi-rugi dayanya :

$$P_L = 3I^2 Z \tag{6}$$

Berikut persamaan untung menghitung rugi-rugi transmisi dengan bentuk jaringan yang diberikan pada gambar 1



Gambar 1 Jaringan transmisi sederhana

Arus yang mengalir dari $i \rightarrow j$ adalah :

$$I_{ij} = I_L + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \tag{7}$$

Dan arus yang mengalir dari $j \rightarrow i$ adalah :

$$I_{ji} = -I_L + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \tag{8}$$

Daya kompleks S_{ij} dari bus $i \rightarrow j$ dan daya kompleks S_{ji} dari bus $j \rightarrow i$ adalah :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \tag{9}$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \tag{10}$$

Rugi-rugi daya pada line $i \rightarrow j$ adalah penjumlahan dari persamaan (20) dan (21) :

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \tag{11}$$

D. Optimal Power Flow

Studi aliran daya atau analisis aliran daya sangat penting baik untuk perencanaan sistem yang baru maupun untuk pengembangan sistem di masa mendatang. Load Flow atau power flow adalah perhitungan magnitudo dan sudut phasa dari tegangan masing-masing bus serta aliran daya aktif maupun daya reaktif pada saluran dalam sebuah jaringan. Informasi yang dapat diperoleh dari studi aliran daya adalah :

1. Aliran daya aktif dan reaktif pada setiap saluran.

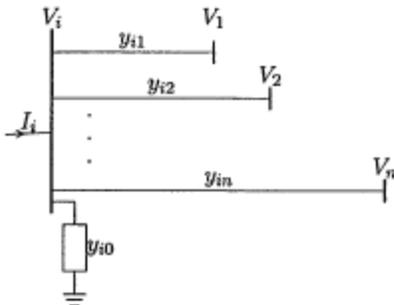
2. Tegangan (harga efektif dan sudut fasa) pada setiap bus.
3. Losses jaringan dapat diketahui.

Dalam studi analisa aliran daya, terdapat 3 macam bus yang harus diketahui masing-masing fungsinya, yaitu :

1. BUS REFERENSI (*slack bus*). Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.
2. BUS PQ (bus beban). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan untuk *magnitude* dan fasa tegangan tidak diketahui.
3. BUS PV (bus pembangkit). Pada tipe bus ini, besar tegangan dan daya aktif telah ditentukan. Sedangkan untuk daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

Pada tiap-tiap bus terdapat 4 besaran, yaitu :

1. Daya real atau daya aktif P
2. Daya reaktif Q
3. Harga skalar tegangan $|V|$
4. Sudut fasa tegangan q



Gambar 2 Tipikal bus dari sistem tenaga listrik

Jika diberikan sistem seperti gambar 3, maka dengan menerapkan KCL (*Kirchoff Current Law*) Persamaan arus yang mengalir I_i yaitu:

$$I_i = y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n) \tag{12}$$

Dimana persamaan admittansi y_{ij} :

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \tag{13}$$

maka persamaan aliran daya aktif dan daya reaktifnya :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \tag{14}$$

Atau :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \tag{15}$$

Atau :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \tag{16}$$

Bila dipisah antara daya aktif dan reaktif maka :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \tag{17}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \tag{18}$$

Persamaan aliran daya tersebut diselesaikan dengan menggunakan suatu proses pengulangan (iterasi) dengan menetapkan nilai-nilai perkiraan untuk tegangan pada bus yang tidak diketahui nilainya dan kemudian menghitung suatu nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai perkiraan pada bus yang lain. Setiap perhitungan suatu himpunan nilai tegangan yang baru disebut sebagai satu iterasi. Proses iterasi ini diulang terus-menerus hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus kurang dari nilai minimum atau tidak melebihi nilai maksimum yang telah ditentukan.

Dengan OPF dapat menyelesaikan permasalahan optimisasi sistem tenaga listrik yang sangat kompleks dengan waktu yang relatif singkat. OPF yang paling umum, biasanya digunakan untuk meminimalkan suatu *objective function* yaitu total biaya dalam interval waktu tertentu.

a) Fungsi Objektif

Cost function sebagai persamaan kuadrat

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \tag{19}$$

P_i adalah daya keluaran dari unit ke- i dan a_i, b_i dan c_i adalah *cost coefficient* unit generator ke- i

b) Batasan Persamaan

Persamaan *power balance* :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \tag{20}$$

$$= \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

c) Batasan Pertidaksamaan

Batasan kapasitas pembangkit :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \tag{21}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}$$

Batasan tegangan :

$$V_{mi}^{min} \leq V_i \leq V_{mi}^{max} \tag{22}$$

Batasan termal transmisi :

$$S_l \leq S_{l,max} \tag{23}$$

di mana

P_i : injeksi daya aktif di bus i

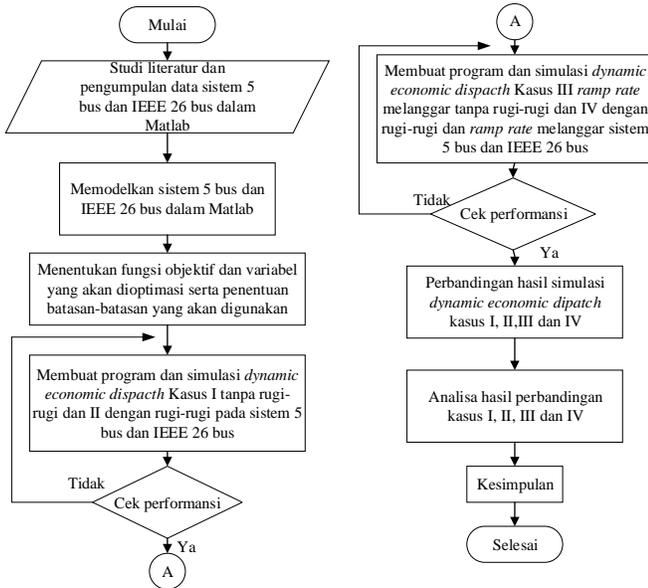
Q_i : injeksi daya reaktif di bus i

P_{Gi} : daya aktif di bus i

- PD_i : pembebanan daya aktif pada di bus i
- QG_i : daya reaktif di bus i
- θ_i : sudut fasa tegangan bus i
- θ_j : sudut fasa tegangan bus j

III. PERANCANGAN SISTEM

Dalam Tugas Akhir ini, *sequential quadratic programming* akan digunakan untuk menerapkan sistem *dynamic economic dispatch* [4]. Pengerjaan yang dilakukan adalah dengan AC opf (*optimal power flow*) di Matpower. Pengolahan data dan simulasi akan dilakukan menggunakan program Matlab menggunakan toolbox Matpower dan akan dikembangkan dengan main program lain yang melibatkan *ramp rate*. Metode ini menghasilkan subproblem dari *quadratic programming* pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya. Proses *quadratic programming* yang diulang atau diterasi biasa disebut IQP (*Iterative Quadratic Programming*) atau RQP (*Recursive Quadratic Programming*) [5].



Gambar 3 Flowchart perancangan sistem

A. OPF dalam Matpower

Permasalahan OPF memiliki dua batasan (*constraint*) yaitu, *equality constraint* (batasan yang sama) dan *inequality constraint* (batasan yang tidak sama). Dalam proses pengolahan OPF di Matpower, kedua batasan tersebut akan digunakan guna untuk mendapatkan hasil yang optimal dan menyerupai sistem kelistrikan yang *real*.

Permasalahan AC OPF secara umum di rumuskan sebagai berikut :

$$\min_x f(x) \tag{24}$$

Subject to :

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \tag{25}$$

Dimana x adalah optimasi vektor yang terdiri dari V_m (*magnitude* tegangan), daya aktif P_g , daya reaktif Q_g dan sudut fasa tegangan θ . Berikut persamaan vektor dari x :

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \tag{26}$$

B. Equality Constraints OPF.

Equality Constraints dalam permasalahan OPF merujuk ke (12) dijadikan dalam satu matrik dg. Dengan n merukan jumlah bus dan b jumlah pembangkitan setiap bus, maka didapat matrik dg sebagai berikut :

$$dg = \begin{matrix} \text{aktif power balance} & \text{reaktif power balance} \\ \begin{bmatrix} \frac{dg}{d\theta_{i1}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{ib}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{i1}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{ib}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{nb}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{dg}{d\theta_{nb}} \\ \frac{dg}{dVm_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{ib}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{ib}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{nb}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dVm_{nb}} \\ \frac{dg}{dPg_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{ib}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{ib}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{nb}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dPg_{nb}} \\ \frac{dg}{dQg_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{ib}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{i1}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{ib}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg}{dQg_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{nb}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{n1}} & \dots & \frac{dg}{dQg_{nb}} \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{27}$$

Didalam matrik ini berisikan θ sebagai sudut tegangan, V_m untuk *magnitude* tegangan, P_g dan Q_g sebagai daya aktif dan reaktif, Semua variabel tersebut merupan hasil iterasi hingga keseimbangan daya pada suatu bus tercapai. dikarenakan pada tugas akhir ini perhitungan OPF dilakukan pada dua kondisi selakigus maka ada dua matrik dg. Namun karena proses yang digunakan adalah DED maka, hanya melibatkan daya aktif saja.

C. Inequality Constraint OPF

Sesuai dengan *inequality constraint* rujuk ke (12) sampai dengan (15), matrik *inequality constraint* untuk matrik lb dan ub mempunyai urutan variabel pada baris matriknya rujuk ke (25).

$$ub = \begin{bmatrix} \theta_1 max \\ \theta_2 max \\ \theta_3 max \\ v_1 max \\ v_2 max \\ v_3 max \\ P_{g1} max \\ P_{g2} max \\ Q_{g1} max \\ Q_{g2} max \end{bmatrix} \quad lb = \begin{bmatrix} \theta_1 min \\ \theta_2 min \\ \theta_3 min \\ v_1 min \\ v_2 min \\ v_3 min \\ P_{g1} min \\ P_{g2} min \\ Q_{g1} min \\ Q_{g2} min \end{bmatrix} \quad (28)$$

Matrik persamaan (27) untuk lb dan ub , dimana n merupakan jumlah bus, sedangkan b merupakan jumlah pembangkit yang terdapat pada sistem.

IV. SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada tugas akhir ini optimasi aliran daya untuk mendapatkan total biaya yang minimal dengan mempertimbangkan kerugian transmisi akan dilakukan menggunakan aplikasi Matlab dengan *toolbox* Matpower yang sudah dimodifikasi sesuai kebutuhan tugas akhir yang dikerjakan. Simulasi yang dilakukan menggunakan 2 *plant* I yaitu sistem 5 bus, dan *plant* II yaitu sistem IEEE 26 bus. Karena tugas akhir ini berjudul *dynamic* maka akan dilakukan proses optimasi aliran daya selama 24 kondisi atau 24 jam. Simulasi akan dilakukan dengan 4 kasus setiap *plant*, berikut studi kasus yang akan di simulasikan :

1. Kasus I

Simulasi DED tanpa mempertimbangkan *losses* dan *ramp rate*.

2. Kasus II

Simulasi DED dengan mempertimbangkan *losses* dan tanpa mempertimbangkan *ramp rate*.

3. Kasus III

Simulasi DED tanpa *losses* namun mempertimbangkan *ramp rate*.

4. Kasus IV

Simulasi DED dengan mempertimbangkan *losses* dan *ramp rate*.

A. Simulasi Kasus I Sistem Tenaga Listrik 5 Bus

Sistem tenaga listrik 5 bus terdiri dari 3 unit generator yang memiliki daya pembangkitan maksimal adalah 230 MW dan minimal 30 MW. Berikut data dari sistem tenaga listrik 5 bus :

Tabel 1
Data cost function sistem 5 bus

Unit	a_i (\$/MWh ²)	b_i (\$/MWh)	c_i	Pmax (MW)	Pmin (MW)
1	0.008	7.0	200	85	10
2	0.009	6.3	180	80	10
3	0.007	6.8	140	70	10

Tabel 2
Parameter ramp up dan ramp down plant I

Unit	Ramp Up	Ramp Down
1	18.5 MW	18.5 MW
2	18 MW	18 MW
3	18 MW	18 MW

Tabel 3
Total biaya tiap kasus plant I

Kasus	Total Biaya (\$/hr)
1	32676.9424
2	32935.9039
3	32676.9914
4	32936.1187

Total beban selama 24 jam adalah 2884.5 MW, jika dengan mempertimbangkan kerugian transmisi maka akan ada kenaikan beban yang semula 2884.5 MW menjadi 2918.92 MW. Kerugian transmisi pada kasus II dan IV berbeda, jika pada kasus II kerugian transmisinya sebesar 34.4041 MW, sedangkan pada kasus IV kerugian transmisinya menjadi 34.4050 MW. Kerugian transmisi pada kasus IV sedikit lebih besar karena, pada kasus IV hasil simulasi mempertimbangkan *ramp rate*.

Pada hasil simulasi, terlihat bahwa total biaya kasus III lebih mahal jika dibanding dengan kasus I hal ini dikarenakan pada kasus III, daya yang dibangkitkan mempertimbangkan *ramp rate*. Pada kasus IV, total biaya yang dibutuhkan lebih mahal jika dibanding dengan kasus II dengan kondisi mempertimbangkan *losses*. Namun, pada kasus IV terdapat parameter *ramp rate* yang dipertimbangkan, maka dari itu daya yang dibangkitkan berbeda dengan daya yang dibangkitkan pada kasus II, perbedaan daya yang dibangkitkan menghasilkan total biaya yang berbeda dan pada kasus IV memiliki total biaya yang sedikit lebih mahal dengan total biaya pada kasus II.

B. Simulasi Kasus I Sistem Tenaga Listrik IEEE 26 Bus

Sistem tenaga listrik IEEE 26 bus memiliki daya pembangkitan maksimal sebesar 1470 MW. Dengan kasus yang sama pada *plant* I, berikut hasil simulasi dari 4 kasus yang digunakan :

Tabel 4
Data cost function sistem 5 bus

Unit	a_i (\$/MWh ²)	b_i (\$/MWh)	c_i	Pmax (MW)	Pmin (MW)
1	0.007	7.0	240	500	100
2	0.0095	10	200	200	50
3	0.009	8.5	220	300	80
4	0.009	11	200	150	50
5	0.008	10.5	220	200	50
26	0.0075	12	190	120	50

Tabel 5
Parameter ramp up dan ramp down kasus I sistem IEEE 26 bus

Unit	Ramp Up	Ramp Down
1	60 MW	60 MW
2	35 MW	35 MW
3	50 MW	50 MW
4	35 MW	35 MW
5	40 MW	40 MW
26	38 MW	38 MW

Tabel 6
Total biaya tiap kasus plant II

Kasus	Total Biaya (\$/hr)
1	228339.0782
2	229878.543
3	228340.8179
4	229880.8689

Total beban selama 24 jam adalah 19077.62 MW, jika dengan mempertimbangkan kerugian transmisi maka akan ada

kenaikan beban yang semula 19077.62 MW menjadi 19203.35 MW. Kerugian transmisi pada kasus II dan IV berbeda, jika pada kasus II kerugian transmisinya sebesar 125.7373 MW, sedangkan pada kasus IV kerugian transmisinya menjadi 125.7382 MW. Kerugian transmisi pada kasus IV sedikit lebih besar karena, pada kasus IV hasil simulasi mempertimbangkan *ramp rate*.

Pada hasil simulasi, terlihat bahwa total biaya kasus III lebih mahal jika dibanding dengan kasus I hal ini dikarenakan pada kasus III, daya yang dibangkitkan mempertimbangkan *ramp rate*. Pada kasus IV, total biaya yang dibutuhkan lebih mahal jika dibanding dengan kasus II dengan kondisi mempertimbangkan *losses*. Namun, pada kasus IV terdapat parameter *ramp rate* yang dipertimbangkan, maka dari itu daya yang dibangkitkan berbeda dengan daya yang dibangkitkan pada kasus II, perbedaan daya yang dibangkitkan menghasilkan total biaya yang berbeda dan pada kasus IV memiliki total biaya yang sedikit lebih mahal dengan total biaya pada kasus II.

V. KESIMPULAN

Dari semua proses pengerjaan tugas akhir yang telah dilalui mulai dari studi literature, perancangan dan simulasi maka terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan terkait dengan tugas akhir ini, yaitu:

1. Dengan menggunakan sistem sederhana 5 bus dan IEEE 26 bus, program dynamic economic dispatch yang dikembangkan menggunakan Matpower dalam MATLAB telah mampu melakukan perhitungan dynamic economic dispatch dengan memberikan hasil keluaran berupa biaya yang diminimalkan dengan mempertimbangkan kerugian transmisi dan juga *ramp rate*.
2. Rugi-rugi transmisi yang digunakan dalam perhitungan DED didapat dari analisis aliran daya menggunakan metode *sequential quadratic program*.
3. Dari hasil simulasi, jika parameter *ramp rate* ada yang dilanggar, maka setiap unit pembangkit akan menyesuaikan ulang daya yang dibangkitkan sehingga daya keluaran tiap unit kembali memenuhi parameter *ramp rate*. *Ramp rate* yang dilanggar oleh unit mengakibatkan total biaya menjadi tidak ekonomis.
4. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa total biaya tiap kasus berbeda. Hal itu dikarenakan pada kasus I dan kasus II, masing-masing *plant* tidak mempertimbangkan *ramp rate*. Untuk kasus III dan kasus IV, masing-masing *plant* mempertimbangkan *ramp rate*. Total biaya yang didapat ketika mempertimbangkan *ramp rate* sedikit lebih mahal dikarenakan harus ada batas perubahan daya untuk jam berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Allen J. Wood & Bruce F. Wollenberg. "Power Generation Operation and Control 2nd Edition". John Wiley & Sons, Inc 1996
- [2] Haiwang Zhong dan Qing Xia, "Dynamic Economic Dispatch Considering Transmission Losses Using Quadratically Constrained Quadratic Program Method," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 27, no. 3, August 2013
- [3] Zainal Abidin, "Dynamic Economic Dispatch Menggunakan Quadratic Programming". Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Surabaya 2012.

- [4] M. Sulaiman, "Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Metode Sequential Quadratic Programming". Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Surabaya 2015.
- [5] Ray D, Zimmerman Carlos E. Murillo-Sanchez, "Matpower 5.1 User's Manual", March 20, 2015. Hill, 1994.