

# Koordinasi Pembangkit Hidro-Termal Berbasis *Dynamic Optimal Power Flow* Menggunakan *Quadratic Programming*

Rasyid Wahyu Wijaya, Rony Seto Wibowo, Soedibyo

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*e-mail:* rasyidww@gmail.com, ronyseto@ee.its.ac.id, soedibyo@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Untuk memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat, pembangkitan tenaga listrik direncanakan sesuai dengan kebutuhan tersebut. Sebagian besar bahan bakar yang digunakan pada pembangkit listrik di Indonesia adalah batubara, minyak dan gas. Semakin menurunnya jumlah energi fosil, mendorong pemerintah untuk meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pada pembangkit energi listrik. Pembangkit listrik hidro-thermal merupakan salah satu alternatif dalam upaya penghematan bahan bakar yang tidak bisa diperbarui. Dengan mengkoordinasikan antara pembangkit hidro dan pembangkit termal diharapkan dapat mensuplay beban yang dinamis dengan memaksimalkan energi air dari pembangkit hidro dan meminimalkan bahan bakar pembangkit termal. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (*Dynamic Optimal Power Flow*) arus searah sebagai dasar pembuatan program. Program akan menentukan pembebanan unit hidro-thermal yang tersambung sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis tiap waktu dengan memperhatikan *ramp rate* unit pembangkit dan aliran daya pada sistem transmisi. Selain itu dengan menggunakan *quadratic programming*, program akan membatasi sistem terhadap batasan (*equality constraint*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*). Simulasi dilakukan berbasis pada sistem IEEE 30 bus dengan menginisialisasi pembangkit ke-6 sebagai unit hidro. Hasil dari simulasi dan analisa menunjukkan bahwa program mampu memenuhi semua batasan dan memaksimalkan penggunaan debit air dalam pembebanan selama 24 jam. Dengan penambahan unit hidro, biaya pembangkitan dapat ditekan.

**Kata Kunci**—*Dynamic Optimal Power Flow* arus searah, Koordinasi pembangkit Hidro-Termal, *Quadratic Programming*, Biaya.

## I. PENDAHULUAN

Sebagai alternatif untuk menekan tingginya penggunaan bahan bakar fosil, maka pemerintah perlu mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan. Salah satu teknik pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pembangkitan tenaga listrik ialah dengan mengkoordinasikan pembangkit listrik termal dan pembangkit listrik hidro. Pembangkit listrik hidro-thermal adalah koordinasi pembangkit dengan mengatur pembebanan. Dimana pengoperasian unit hidro dilakukan semaksimal mungkin mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.

Penyediaan listrik harus memenuhi beban yang bersifat *continue* dan dinamis. Hal ini memerlukan

manajemen operasi yang tertib agar didapatkan suatu pembebanan dan penyaluran yang optimal dan ekonomis. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (*Dynamic Optimal Power Flow*) untuk melakukan pembagian pembebanan unit hidro-thermal yang tersambung dengan sistem. Sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis dengan memperhatikan batasan *ramp rate* unit pembangkit dan kapasitas saluran pada sistem transmisi [3]. *DOPF* merupakan perhitungan yang melibatkan studi aliran daya (*load flow*). Studi aliran daya meliputi sudut fasa tegangan masing masing bus lalu perhitungan magnitude dan aliran daya aktif maupun daya reaktif pada saluran [4]. Untuk studi aliran daya terbagi menjadi dua yaitu studi aliran daya arus searah dan studi aliran daya aris bolak balik. Dalam hal ini melakukan perhitungan aliran daya searah lebih cepat dibanding dengan perhitungan arus bolak balik [5][6].

Pada tugas akhir ini digunakan algoritma *quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan pembagian pembebanan dalam koordinasi pembangkit hidro-thermal yang berbasis *DOPF*.

## II. KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW* ARUS SEARAH

### A. *Dynamic Optimal Power flow*

Pada kondisi real, beban sistem berubah ubah secara dinamis selama 24 jam. Pada penelitian ini diasumsikan beban berubah dengan selang waktu 1 jam. Dengan beban yang dinamis, penyelesaian *OPF* disebut juga dengan *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)*.

Untuk menyelesaikan permasalahan *DOPF*, perlu diperhatikan pula mengenai *ramp rate* pembangkit dan batasan lainnya. *Ramp rate* merupakan batasan kenaikan atau penurunan nilai pembangkitan pada generator. Hal ini untuk menjaga gradien temperatur dan tekanan generator dalam batasan aman sehingga mencegah kerusakan dan menjaga masa hidup generator [9].

### B. *Ramp rate*

*Ramp-rate* merupakan kemampuan generator untuk melakukan peningkatan (*up-rate*) atau penurunan (*down-rate*) generasi. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga membutuhkan fungsi tertentu untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Fungsi *ramp-rate* dapat dilihat dalam persamaan:

$$UR_i + P_i(t - 1) = P_i \max \quad (1)$$

$$P_i(t - 1) - DR_i = P_i \min \quad (2)$$





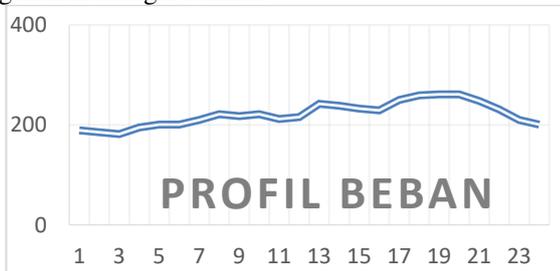
2) *Kondisi II*

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* ( $\delta$ ) tanpa batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

3) *Kondisi III*

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* ( $\delta$ ) dan batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

Validasi dilakukan terhadap program menggunakan *case file* IEEE 30 bus, yang terdiri oleh 6 pembangkit dan 30 saluran. Pembangkit ke-6 pada *case file* tersebut diinisialkan sebagai pembangkit hidro. Profil beban yang digunakan sebagai berikut:



Gambar 3. Profil Beban

Total beban selama 24 jam adalah 5312.75 MW

B. *Simulasi Kondisi I*

Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit pada kondisi I

TABEL 1. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI I

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1-24	1165.5	1501.9	540.31	597.21	497.82	1009.9
<b>Total</b>	5312.75					

Dari hasil simulasi diatas dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan tiap unit tidak melebihi kapasitas maksimal dari setiap unit pembangkit. Hal ini membuktikan bahwa hasil simulasi memenuhi ( $P_{Gi}min \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}max$ ). Selain itu, hasil tersebut juga membuktikan bahwa total pembangkitan daya aktif sama dengan beban daya aktif sesuai persamaan *power balance*. Namun hasil tersebut tidak memenuhi batasan *ramp rate* tiap pembangkit yang sebesar  $-5 MW \leq \delta \leq 5 MW$ .

*Ramp rate* yang terlanggar pada kondisi I :

TABEL 2. RAMP RATE PADA KONDISI I

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
12	13	-5.05	-5.76	-4.64	-2	-5.22	-3.81
17	18	8.73	10.36	-14.7	-6.47	-1.97	-5.41
18	19	2.84	3.39	-6.18	0.62	-1.13	-1.43
20	21	-11.19	-13.31	21.24	6.01	3.52	6.97
22	23	3.63	4.15	3.16	1.33	3.41	5.14

Berdasarkan dari tabel *ramp rate* pada kondisi I diketahui bahwa seluruh unit pembangkit melanggar batasan *ramp rate*. Pelanggaran *ramp rate* tertinggi terjadi oleh unit 3 pada *t*-20 sebesar 21.24 MW. Hal ini terjadi karena kenaikan dan penurunan beban yang signifikan.

Aliran daya pada kondisi I

TABEL 3. ALIRAN DAYA PADAKONDISI I

dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)			
			jam 1	jam 16	jam 19	
30	15	23	16	9.8	13.4	16
35	25	27	16	11.619	16	16

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa program telah memenuhi batas kapasitas saluran. Dimana aliran daya mencapai batas maksimal pada kapasitas saluran terdapat pada saluran ke-30 jam ke-19 dan saluran ke-35 jam ke-16,19. Perbedaan daya yang mengalir pada saluran bergantung pada beban disetiap bus. Selain itu daya yang mengalir pada saluran menyesuaikan dengan jumlah beban yang ada untuk memenuhi batasan *power balance*.

C. *Simulasi Kondisi II*

Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit pada kondisi II :

TABEL 4. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI II

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1-24	1141.1	1472.3	540.31	618.64	592.81	484.14
<b>Total</b>	5312.72					

Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa dengan profil beban yang sama, total daya yang dibangkitkan tidak ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi I.

*Ramp rate* maksimal pada kondisi II :

TABEL 5. RAMP RATE PADA KONDISI II

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
12	13	-5	-5	-4.99	-2.16	-5	-4.33
15	16	1.77	2.01	-5	0.63	1.62	2.76
16	17	-2.07	-1.9	-5	-2.76	-4.14	-4.93
17	18	4.81	5	-5	-5	-5	-4.27
18	19	2.22	3.65	-5	-0.66	-0.68	-1.43
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5

Dari tabel diatas diketahui bahwa program mampu membatasi kenaikan maupun penurunan daya yang dibangkitkan dalam  $-5 \leq \delta \leq 5 MW$ . Data diatas merupakan nilai *ramp rate* maksimal oleh unit ke-*i* pada jam ke-*i*.

Aliran daya pada kondisi II

TABEL 6. ALIRAN DAYA PADAKONDISI II

dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)			
			jam 1	jam 16	jam 19	
30	15	23	16	9.8	10.65	16

Berdasarkan tabel aliran daya program masih berjalan dengan baik. Karena daya yang mengalir masih berada dalam batas saluran. Daya mengalir pada kapasitas saluran maksimal terdapat pada saluran ke-30, jam ke-19. Dari 3 variabel yang di analisa daya yang dibangkitkan, *ramp rate*, kapasitas saluran program mampu mendapatkan hasil yang diinginkan.

D. *Simulasi Kondisi III*

Simulasi pada kondisi III merupakan simulasi terakhir dr program dengan menambahkan batasan pada unit hidro. Batasan tersebut berupa volume air yang harus dihabiskan unit hidro selama 24 jam. Dalam hal ini pembangkit ke-6 pada *case* IEEE 30 bus di inisialkan sebagai unit hidro dengan menganggap *cost function* = 0. Berikut adalah daya yang di bangkitkan pada kondisi ke III :

TABEL 7. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI III

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro
1-24	1215.9	1557.9	676.56	616.9	545.22	700
<b>Total</b>	5312.67					

Tidak terjadi selisih daya yang terbangkit dengan dua kondisi sebelumnya. Selanjutnya adalah analisa unit hidro dimana total daya yang dibangkitkan harus sama dengan volume air hidro. Sesuai dengan persamaan :

$$15_{ph} + 300 = Q \tag{26}$$

Dalam hal ini volume air untuk membangkitkan unit hidro adalah sebesar 17700 acre-feet. Berikut adalah daya yang dibangkitkan oleh unit hidro:

TABEL 4.8 DAYA YANG DIBANGKITKAN UNIT HIDRO

jam	daya MW	persamaan	Q (acre-feet)
1	8.53	15ph +300	427.95
2	7.13	15ph +300	406.95
3	5.73	15ph +300	385.95
4	10.64	15ph +300	459.6
5	12.75	15ph +300	491.25
6	12.75	15ph +300	491.25
7	16.26	15ph +300	543.9
8	19.07	15ph +300	586.05
9	20.47	15ph +300	607.05
10	20.47	15ph +300	607.05
11	23.87	15ph +300	658.05
12	28.87	15ph +300	733.05
13	33.87	15ph +300	808.05
14	31.91	15ph +300	778.65
15	36.91	15ph +300	853.65
16	41.91	15ph +300	928.65
17	46.91	15ph +300	1003.65
18	51.91	15ph +300	1078.65
19	53.34	15ph +300	1100.1
20	53.34	15ph +300	1100.1
21	48.34	15ph +300	1025.1
22	43.34	15ph +300	950.1
23	38.34	15ph +300	875.1
24	33.34	15ph +300	800.1
<b>Total</b>			<b>17700</b>

Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa total daya yang di bangkitkan sama dengan jumlah debit air yang dihabiskan

Ramp rate maksimal pada kondisi III

TABEL 9. RAMP RATE PADA KONDISI III

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro
11	12	0.5	0.57	0.39	0.16	-0.39	-5
12	13	-4.26	-4.84	-4.99	-2.41	-5	-5
14	15	3.42	3.91	-0.47	1.09	2.73	-5
15	16	4.22	4.83	-5	1.35	3.38	-5
16	17	-1.96	-1.68	-5	-2.68	-4.48	-5
17	18	5	5	-5	-5	-4.46	-5
18	19	2.18	3.69	-5	-0.66	-0.68	-1.43
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5

Dari data diatas dapat diketahui bahwa program masih memenuhi batasan berupa ramp rate maupun volume air pada unit hidro.

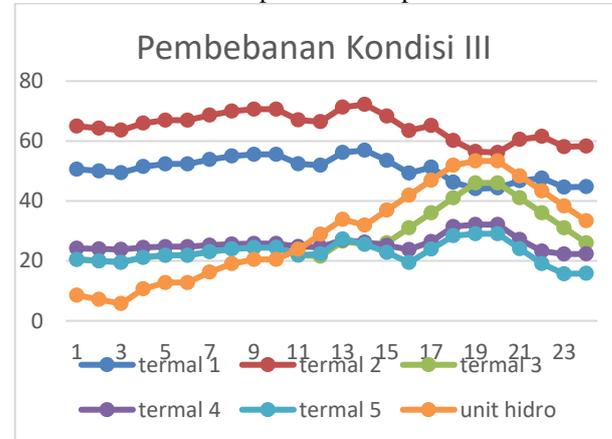
Sedangkan untuk aliran daya dapat dilihat pada tabel berikut:

TABEL 10. ALIRAN DAYA PADA KONDISI III

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
29	21	22	32	18.5	24	32
30	15	23	16	9.2	10.65	16
35	25	27	16	1.857	14.52	16

Dengan penambahan unit hidro pada kondisi ke III ini aliran daya masih berada dalam batasan kapasitas saluran. Aliran daya pada saluran ke 29,30,35 pada jam ke-19 mencapai batasan maksimal kapasitas saluran.

Berikut adalah kurva pembebanan pada kondisi III:



Gambar 4. Pembebanan pada kondisi III

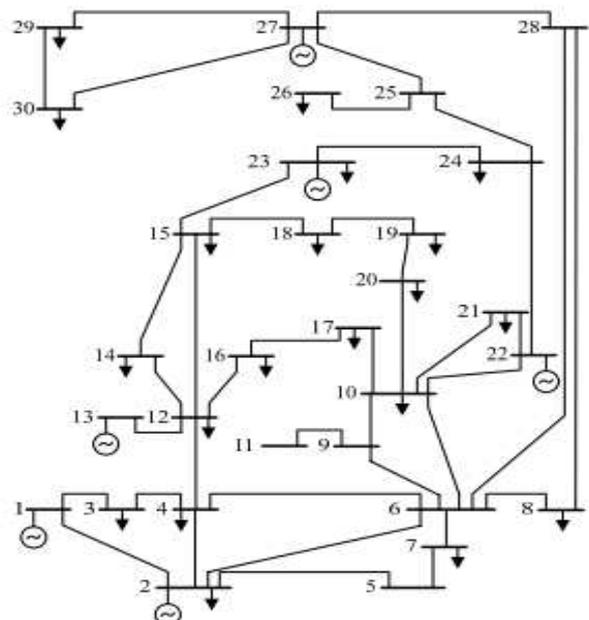
E. Biaya Total Sistem

Berdasarkan dari hasil simulasi pada 3 kondisi yang telah dilakukan, didapatkan total biaya yang berbeda. Berikut adalah total biaya pada setiap kondisi:

TABEL 11. ALIRAN DAYA PADA KONDISI III

Kondisi	Program	Total Biaya (\$)
I	DOPF arus searah tanpa batasan ramp rate	16666
II	DOPF arus searah dengan batasan ramp rate	16698
III	DOPF arus searah dengan batasan ramp rate, dan penambahan unit hidro	11731

Dari data diatas dapat dilihat bahwa selisih biaya pada kondisi I dengan kondisi II yaitu penambahan batasan ramp rate hanya sedikit. Sedangkan saat penambahan unit hidro pada kondisi II biaya dapat ditekan. Mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.



Gambar 5. Single line IEEE 30 bus

Bus 1 : Terhubung Termal 1  
 Bus 2 : Terhubung Termal 2  
 Bus 22 : Terhubung Termal 3  
 Bus 27 : Terhubung Termal 4  
 Bus 23 : Terhubung Termal 5  
 Bus 13 : Terhubung Unit Hidro

#### V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Batasan *power balance* dan batasan kapasitas saluran merupakan hal utama yang dapat dipenuhi program *DOPF* arus searah pada tugas akhir ini.
2. *Ramp rate* merupakan batasan yang berkaitan dengan kapasitas fisik dari pembangkit, yang apabila tidak terpenuhi akan mengganggu kinerja pembangkit dalam kurun waktu tertentu. Program *DOPF* arus searah yang dibuat dapat memenuhi batasan *ramp rate* tersebut.
3. Berdasarkan program yang telah dibuat, unit hidro mampu menghabiskan volume air yang tersedia dalam pembangkitan selama 24 jam.
4. Dengan penambahan satu unit hidro, total biaya pembangkitan dapat ditekan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muchlis, Moch., Adhi Darma Permana. "Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN", Jakarta, 2004.
- [2] Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi (PTPSE), "OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2015", Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Jakarta, 2015
- [3] Wibowo, Rony Seto, Nursidi, IGN Satriyadi H, Uman DF P, Adi Adi Soeprijanto, and Ontoseno Ontoseno Penangsang. "Dynamic DC Optimal Power Flow Using Quadratic Programming", 978-1-4799-0425-9/13 ©2013 IEEE. Surabaya, 2013.
- [4] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [5] Wood, Allen J, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, New York, 1996.

- [6] Momoh James, A., El-Hawary, M.E, Adapa, R., "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part II: Newton, Linear Programming, and Interior Point Methods", IEEE Trans, Power Sys., 1999, vol.14, pp.105-111, Januari, 1999.
- [7] Cain, Mary B., O'Neill, Richard P., Castillo, Anya, "History of Optimal Power Flow and Formulations", Desember 2012
- [8] Carpentier, J, "Optimal Power Flows" Paris, IPC Business Press, Vol 1, No 1, April, 1979 .
- [9] T Nikman, MR Narimani, J Ahgei, S Tabatabaei, M Nayeripour, Modified Honey Bee Mating Optimization to Solve Dynamic Optimal Power Flow Considering Generator Constraints, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol.5, No.10, pp.989-1002, Januari 2011.
- [10] Jensen, Paul A., Bard, Jonathan F., "Operations Research Models and Methods", Wiley, 2002.
- [11] Simoes Costa A, Uturbey W, "Dynamic Optimal Power Flow Approach to Account for Consumer Response in Short term hydrothermal coordination studies" IET Generation, Transmission and Distribution, 2007.
- [12] Ameli, Mohammad Taghi, Moslehpour, Saeid, Golnadsadat, Mahdavihah, "Determining the Spinning Reserve In Power Systems By Corrected Recursove PJM Method", Proc. of the 2008 IAJC-IJME International Conference, 2008.

#### BIOGRAFI PENULIS



**Rasyid Wahyu Wijaya**, lahir di kota Klaten pada tanggal 12 Oktober 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan di-SDN 2 Somopuro, SMPN 1 Prambanan, dan SMAN 2 Klaten. Kemudian penulis menyelesaikan program diploma tiga (D3) di Universitas Gadjah Mada dengan jurusan teknik elektro dengan program studi teknik listrik. Dan saat ini tengah menempuh program strata satu (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Noverber dengan jurusan teknik elektro, bidang studi teknik sistem tenaga.