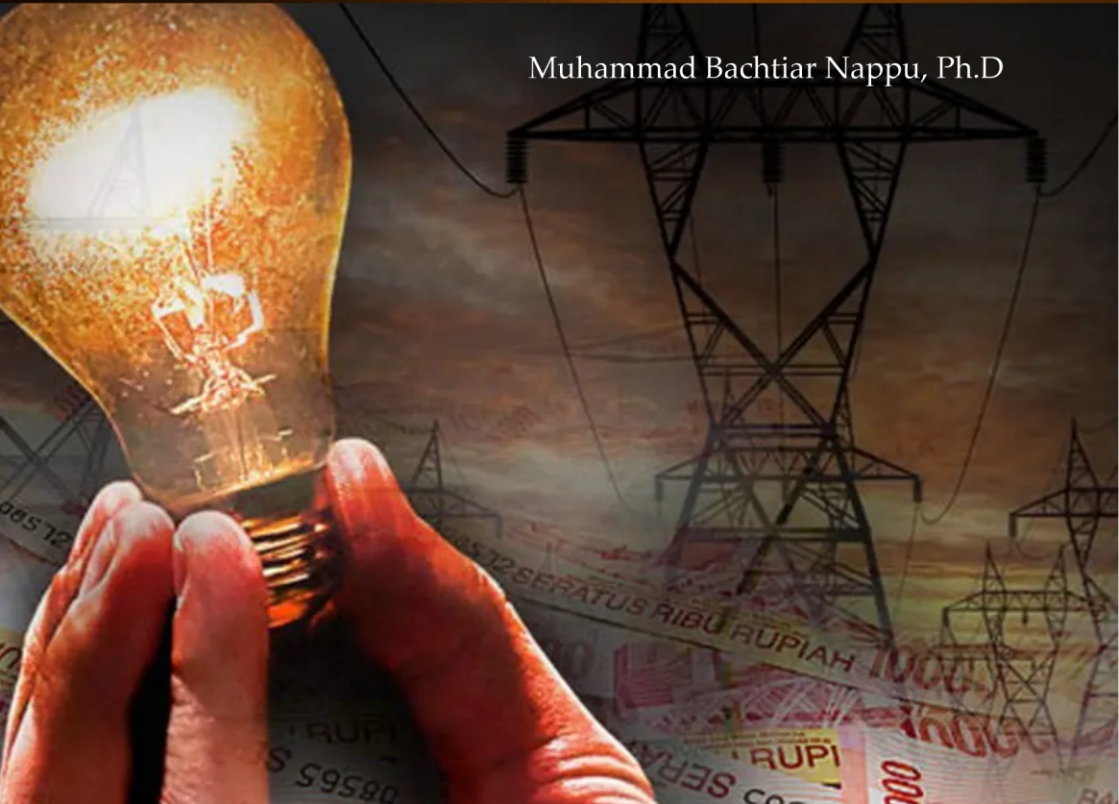


Penerbit
TOHAR MEDIA



**Analisis Harga Energi Listrik
Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan
Dengan Teknik *Direct Current*
*Optimal Power Flow***

Muhammad Bachtiar Nappu, Ph.D



~ Buku Referensi ~

**Analisis Harga Energi Listrik
Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan
Dengan Teknik Direct Current Optimal
Power Flow**

Penulis

Muhammad Bachtiar Nappu, Ph.D

Penerbit

TOHAR MEDIA

Analisis Harga Energi Listrik Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan Dengan Teknik Direct Current Optimal Power Flow

Penulis : Muhammad Bachtiar Nappu, Ph.D

ISBN : 978-623-8148-55-4

Desain Sampul dan Tata Letak

Ai Siti Khairunisa

Penerbit

CV. Tohar Media

Anggota IKAPI No. 022/SSL/2019

Redaksi :

JL. Rappocini Raya Lr 11 No 13 Makassar

JL. Hamzah dg. Tompo. Perumahan Nayla Regency Blok D No.25
Gowa

Telp. 0852-9999-3635/0852-4352-7215

Email : toharmedia@yahoo.com

Website : <https://toharmedia.co.id>

Cetakan Pertama Mei 2023

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik termasuk memfotocopy, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Undang-undang Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak **Rp. 5.000.000.000,00 (Lima Miliar Rupiah)**
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat 1, dipidana paling lama **5 (lima tahun)** dan/atau denda paling banyak **Rp. 500.000.000,00 (Lima Ratus Juta Rupiah)**

KATA PENGANTAR

Assalamu Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Syukur Alhamdulillah Rabbil 'Alamin. Puji syukur kehadiran ALLAH Subhanahu Wata'ala, yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, atas nikmat dan karunia yang telah banyak diberikan, dan sholawat serta salam untuk junjungan Nabi akhir zaman Muhammad Rasulillahi Sallallahu Alaihi Wasallam. Atas izin ALLAH serta hanya atas Rahmat, Hidayah, Inayah dan Ridho ALLAH yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, penulis dapat menyelesaikan buku referensi "**Analisis Harga Energi Listrik Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan Dengan Teknik Direct Current Optimal Power Flow**". Buku referensi ini merupakan salah satu wujud tulisan yang berisi paparan teori, konsep dan hasil penelitian terkait pengoperasian sistem tenaga listrik dalam kaitannya dengan upaya untuk mendapatkan harga energi listrik yang fair dan kompetitif di lingkungan pasar ketenagalistrikan yang terderegulasi.

Harapan penulis buku referensi ini dapat digunakan sebagai acuan dan tambahan ilmu pengetahuan bagi mahasiswa S1, S2 maupun S3, pengajar, peneliti sistem tenaga, perencana/insinyur sistem tenaga ataupun pihak lain yang berminat mempelajari atau meneliti hal terkait

pasar ketengalistrikan kompetitif. Penulis berharap buku monograf ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan ke depan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, 6 April 2023

DAFTAR ISI

Halaman Depan	_i
Halaman Penerbit	_ii
Kata Pengantar	_iii
Daftar Isi	_vi
Daftar Gambar	_vii
Daftar Tabel	_viii
Bab 1. Pendahuluan	_1
1.1. Latar Belakang	_1
1.2. Hipotesa Awal	_2
1.3. Urgensi dan Manfaat	_2
Bab 2. Penjadwalan Ekonomis dalam Sistem Tenaga Listrik	_5
2.1. Operasi Sistem Tenaga Listrik	_5
2.2. Sistem Tenaga yang Dideregulasi	_6
2.3. Karakteristik Unit Pembangkit	_9
2.4. Road Map Penelitian	_10
2.5. Penjadwalan Ekonomis Mengabaikan Rugi-Rugi Jaringan	_10
2.6. Metode Penyelesaian	_13
Bab 3. Metode Aliran Daya Optimal	_21
3.1. Aliran Daya Optimal	_21
3.2. Waktu dan Lokasi Investigasi	_39
3.3. Jenis Investigasi	_39
3.4. Instrumen Penelitian	_40
3.5. Rancangan Penelitian	_40

Bab 4. Perhitungan Harga Energi Tanpa Rugi Jaringan	_43
4.1. Formulasi Model Objective Function	_43
4.2. Formulasi Model Constraint Functions	_43
4.3. Pemodelan Harga Energi Mengabaikan Rugi Jaringan Menggunakan DC-OPF	_44
4.4. Diagram Satu Garis dan Detail Sistem	_44
4.5. Analisis Hasil Implementasi	_47
Bab 5. Penutup	_55
5.1. Ringkasan Unjuk Kinerja	_55
5.2. Rekomendasi	_55
Daftar Pustaka	_57
Indeks	_73
Profil Penulis	_76

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1. Utilitas listrik tradisional yang monopoli dan terintegrasi secara vertikal _7
- Gambar 2. Ilustrasi model pasar listrik yang Dideregulasi _7
- Gambar 3. Struktur pasar listrik yang kompetitif _9
- Gambar 4. N unit termal berkomitmen untuk melayani beban P_D _11
- Gambar 5. Penjadwalan ekonomis dengan metode Literasi Lambda _14
- Gambar 6. Penjadwalan Ekonomis dengan Metode Gradien _17
- Gambar 7. Diagram satu garis sistem tiga bus _45
- Gambar 8. *Objective Cost* Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless* Menggunakan metode DC-OPF _48
- Gambar 9. Merchandising Surplus Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless* Menggunakan metode DC-OPF _49
- Gambar 10. Aliran Daya Tanpa Kendala Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless* _52
- Gambar 11. Aliran Daya Terkendala Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless* _53

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Fungsi Tujuan, Kendala dan Kontrol Pada OPF	_25
Tabel 2.	Detail Generator dan Jaringan Sistem	_46

DAFTAR ISTILAH

<i>UMP</i>	<i>uniform marginal price</i>
<i>Redispatch</i>	<i>penjadwalan ulang</i>
<i>LMP</i>	<i>locational marginal price</i>
<i>DC-OPF</i>	<i>direct current-optimal power flow</i>
<i>OPF</i>	<i>optimal power flow</i>
<i>losses</i>	<i>rugi-rugi daya listrik</i>
<i>lossless</i>	<i>tanpa rugi-rugi daya listrik</i>
<i>gross input</i>	<i>jumlah masukan</i>
<i>net output</i>	<i>jumlah keluaran</i>
<i>EMS</i>	<i>energy management system</i>
<i>MW</i>	<i>satuan daya aktif</i>
<i>MVA_r</i>	<i>satuan daya reaktif</i>
<i>DC</i>	<i>direct current</i>
<i>AC</i>	<i>alternating current</i>
<i>MS</i>	<i>merchandising surplus</i>
<i>NB</i>	<i>jumlah bus</i>
<i>NG</i>	<i>jumlah bus generator</i>
<i>NV</i>	<i>jumlah bus yang dikendalikan tegangan</i>
<i>P_i</i>	<i>injeksi daya aktif ke bus i</i>

Q_i	<i>injeksi daya reaktif ke bus i</i>
P_{Gi}	<i>generasi aktif di bus i</i>
Q_{Gi}	<i>generasi reaktif pada bus i</i>
P_{Di}	<i>beban aktif pada bus i</i>
Q_{Di}	<i>beban reaktif pada bus i</i>
V_i	<i>besar tegangan pada bus i</i>
δ_i	<i>sudut fasa tegangan pada bus i</i>
N	<i>jumlah unit generator</i>
P_D	<i>beban daya listrik</i>
F_i	<i>biaya unit generator</i>
F_T	<i>biaya total pembangkitan</i>
λ	<i>pengali Lagrangian</i>

~ Buku Referensi ~

**Analisis Harga Energi Listrik
Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan
Dengan Teknik Direct Current Optimal
Power Flow**

Penulis

Muhammad Bachtiar Nappu, Ph.D

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Masalah mendasar dalam sebuah pasar listrik yang kompetitif adalah mekanisme penetapan harga energi listrik. Mekanisme ini akan mempunyai korelasi langsung dengan manajemen transmisi. Pada lingkungan pasar listrik kompetitif, perbedaan harga-harga energi listrik pada seluruh jaringan akan tercipta sebagai hasil dari adanya kendala transmisi dan rugi-rugi jaringan. Jika tidak terdapat kongesti pada garis transmisi serta rugi jaringan diabaikan, maka biaya energi listrik akan sama di setiap titik atau bus. Kondisi ini dikenal dengan istilah *uniform marginal price* (UMP). Akan tetapi, ketika aliran daya melebihi kendala-kendala transmisi, dibutuhkan penjadwalan ulang (*redispatch*) jumlah keluaran setiap pembangkit, yang selanjutnya akan menyebabkan berbedanya harga listrik pada setiap bus. Fenomena ini didefinisikan sebagai *locational marginal price* (LMP). Berdasarkan pada fakta ini, penentuan harga energi listrik dan manajemen transmisi mempunyai hubungan yang

sangat kuat, dimana dibutuhkan kajian yang mendalam serta penelitian lebih lanjut dalam usaha untuk mendapatkan kepastian harga energi listrik yang efisien dan transparan untuk semua pihak.

1.2 HIPOTESA AWAL

Pengembangan lanjut skema LMP sebagai model penentuan harga energi listrik menggunakan metode *direct current-optimal power flow* (DC-OPF) diharapkan dapat mengatasi mahalnya biaya pembangkitan dan pengiriman energi listrik. Secara ringkas, rumusan permasalahan pada analisis ini adalah bagaimana menerapkan metode dengan tepat dalam menghitung harga energi listrik khususnya ketika jaringan kelistrikan mengalami kongesti. Untuk kesederhanaan model yang dikembangkan, skema yang dibentuk mengabaikan efek rugi-rugi (*losses*) transmisi.

1.3 URGENSI DAN MANFAAT

Urgensi utama penelitian ini adalah untuk mengkaji sebuah perspektif baru dalam menentukan harga optimal energi listrik yang sesuai dengan biaya marginal dan tingkat ke-ekonomian sumber pembangkitnya.

Metode analisis yang dikembangkan bertujuan menginvestigasi lebih lanjut penentuan harga energi listrik yang optimal dengan menggunakan metode DC-OPF. Secara terperinci teknik ini akan memberi solusi dalam usaha menerapkan metode secara tepat untuk

BAB 2

PENJADWALAN EKONOMIS DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 OPERASI SISTEM TENAGA LISTRIK

Berhubung energi listrik baik yang berasal dari energi baru dan terbarukan ataupun energi konvensional tidak dapat disimpan dalam jumlah besar, maka daya listrik harus dibangkitkan dan didistribusikan pada saat bersamaan sesuai dengan besarnya beban. Sistem jaringan transmisi dan distribusi kemudian digunakan untuk menjembatani aliran daya listrik dari pembangkit ke beban. Konfigurasi sederhana sebuah sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi pada dasarnya mempunyai tiga bagian utama yakni: generator sebagai sumber energi listrik, saluran transmisi untuk mentransmisikan daya listrik ke daerah yang jauh, serta beban yang mengkonsumsi daya listrik.

Untuk itu, dibutuhkan operasi sistem tenaga yang efisien, murah, dan andal dengan mengatur ketersediaan sumber-sumber pembangkitan energi listrik dalam

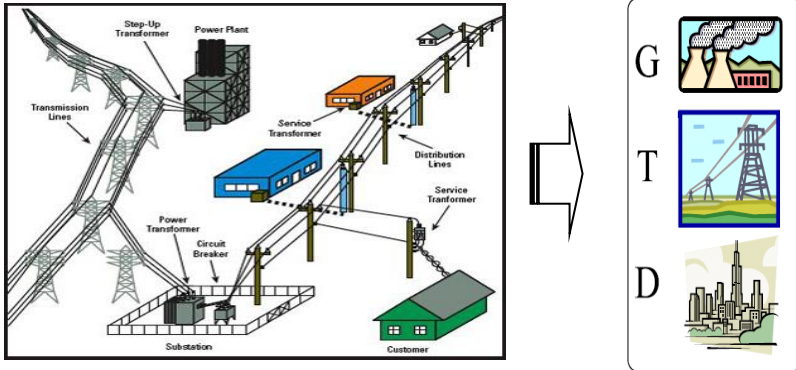
menyuplai kebutuhan beban untuk memastikan penjadwalan pembangkit yang ekonomis (FERC 2005). Landasan utama akan pentingnya pengoperasian sistem tenaga listrik secara ekonomis adalah untuk meminimalkan total biaya pembangkitan namun tidak melanggar kendala-kendala operasional dari sumber-sumber pembangkitan yang tersedia (Chowdhury and Rahman 1990).

Biaya produksi pembangkitan dianalisa selama proses penjadwalan dengan mempertimbangkan biaya bahan bakar dan keluaran daya generator. Persamaan kuadratik lalu digunakan untuk meng-approximasi fungsi biaya disertai dengan beberapa koefisien biaya.

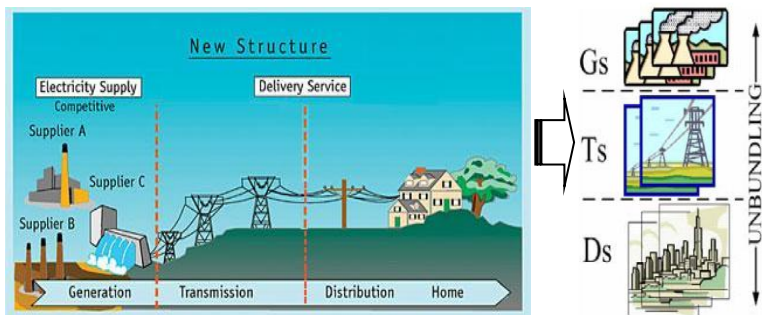
2.2 SISTEM TENAGA YANG DIDEREGULASI

Dalam beberapa dekade terakhir, negara-negara maju di seluruh dunia mengambil langkah untuk mereformasi infrastruktur kelistrikan mereka karena telah menjadi bagian mendasar dari instrumen pembangunan ekonomi yang berkelanjutan. Gambar 1 mengilustrasikan kepemilikan publik tradisional monopoli sebelumnya, juga dikenal sebagai model layanan utilitas terintegrasi vertikal, yang bertanggung jawab untuk menyediakan pelanggan waralabanya dengan berbagai layanan listrik. Model ini telah ditransformasikan menjadi model bisnis kepemilikan swasta, pembangkitan, transmisi, distribusi dan ritel dan pengenalan persaingan ke dalam industri ketenagalistrikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 Struktur persaingan di pasar listrik yang dideregulasi

seharusnya memiliki potensi untuk mendorong efisiensi ekonomi industri kelistrikan [3-5] .

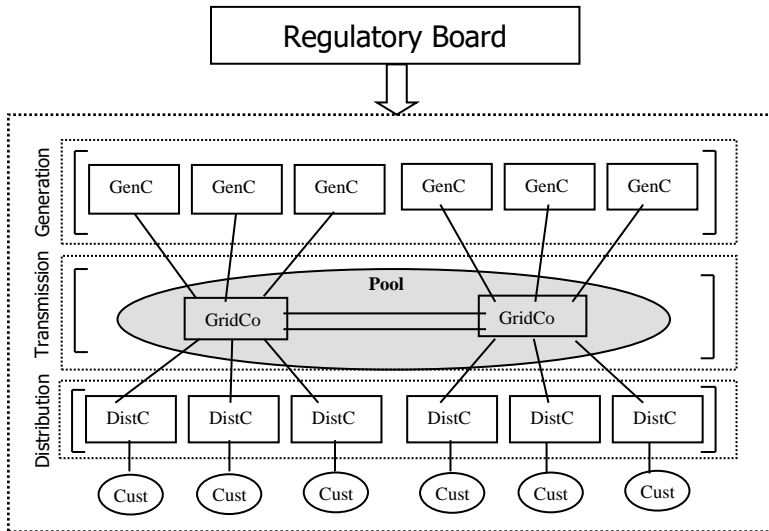


Gambar 1 Utilitas listrik tradisional yang monopoli dan terintegrasi secara vertikal [6]



Gambar 2 Ilustrasi model pasar listrik yang dideregulasi [7]

Pemisahan industri yang biasa membedakan antara pembangkitan, transmisi dan distribusi. Gambar 2 menunjukkan garis besar struktur pasar kelistrikan



Gambar 3 Struktur pasar listrik yang kompetitif [3]

2.3 KARAKTERISTIK UNIT PEMBANGKIT

Dalam mengevaluasi problem yang berhubungan dengan operasi ekonomis suatu pusat pembangkit, kumpulan karakteristik masukan-keluaran dari unit-unit pembangkit termal penting untuk diketahui. Faktor yang mempengaruhi karakteristik unit pembangkitan adalah jumlah masukan, *gross input*, terhadap jumlah keluaran, *net output*. Besaran *gross input* pusat pembangkit dapat merupakan jumlah masukan yang dibutuhkan dalam satuan dollar per jam atau jumlah ton batubara per jam atau banyaknya gas dalam jutaan meter kubik per jam.

Sementara *net output* pusat pembangkit menyatakan ketersediaan keluaran daya listrik untuk diinjeksikan ke dalam sistem tenaga. Total biaya operasi meliputi biaya bahan bakar, biaya tenaga kerja, serta biaya operasi dan perawatan.

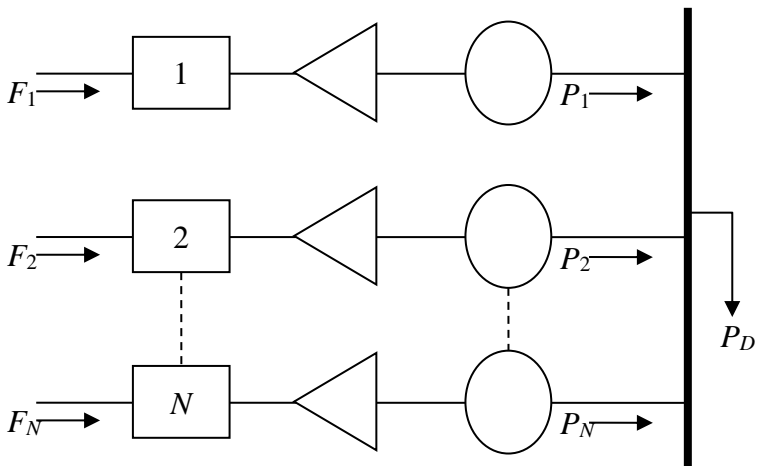
2.4 ROAD MAP PENELITIAN

Dewasa ini *optimal energy pricing* mempunyai berbagai macam fungsi disamping menjadi kunci utama dalam industri ketenagalistrikan (Tamimi and Vaez-Zadeh 2008). *Optimal power flow* (OPF) sekarang menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam menjadwalkan pembangkitan daya listrik serta menentukan harga energi (Hogan 1998; Singh, Hao et al. 1998; Hamoud and Bradley 2004) dalam bentuk LMP mengingat akan kecepatan dan ketangguhannya (Christie, Wollenberg et al. 2000; Sarkar and Khaparde 2009). Metode DC-OPF adalah metode yang paling sering dioperasikan dalam perencanaan dan simulasi pasar (Wu, Wang et al. 2004; Junjie and Tesfatsion 2007; Li and Bo 2007), dan telah digunakan secara luas terutama untuk menangani masalah-masalah yang terkait kongesti transmisi.

2.5 PENJADWALAN EKONOMIS MENGABAIKAN RUGI-RUGI JARINGAN

Misalkan ada pembangkit listrik dengan sejumlah unit generator N yang terhubung ke bus-bar tunggal untuk melayani beban daya listrik yang diberikan P_D (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, di mana tingkat biaya

unit adalah representasi dari input F_i . Dengan demikian, akumulasi biaya setiap unit pembangkit akan menjadi total biaya sistem. Kesetaraan antara total daya keluaran dan permintaan beban merupakan kendala utama atas fungsi tujuan operasi sistem, F_T . Fungsi tujuannya adalah untuk meminimalkan total biaya untuk memasok permintaan yang ditunjukkan P_D dengan mengalokasikan pembangkit listrik nyata untuk setiap generator.



Gambar 4 N unit termal berkomitmen untuk melayani beban P_D [14]

Secara matematis, masalah optimasi yang mengabaikan rugi-rugi jaringan dapat dinyatakan sebagai:

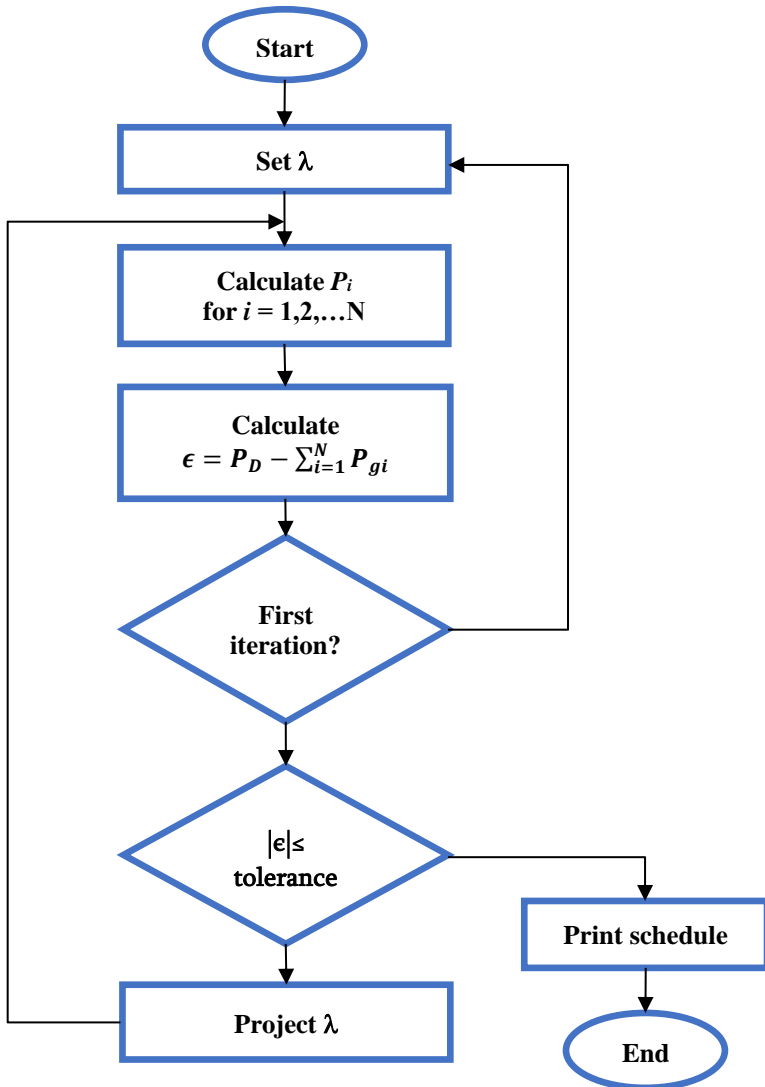
$$\begin{aligned} \text{Minimalkan } F_T &= F(P_{Gi}) = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \\ &= \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi}) \end{aligned}$$

2.6 METODE PENYELESAIAN

Hal ini dapat dicapai untuk memodelkan berbagai masalah dalam perencanaan, desain, kontrol dan pengukuran dalam sistem tenaga. Secara tradisional, pendekatan pengiriman ekonomi telah digunakan untuk optimalisasi operasi ekonomi pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Bagian ini menggambarkan beberapa pendekatan dasar dalam memecahkan masalah pengiriman ekonomi.

A. Metode Iterasi Lambda

Metode iterasi lambda adalah jenis perhitungan iteratif untuk pengiriman ekonomi di mana aturan penghentian harus ditetapkan. Diagram blok dari solusi metode iterasi lambda untuk semua masalah pengiriman termal yang mengabaikan kerugian ditunjukkan pada Gambar 5 di mana aturannya didasarkan pada pencapaian titik operasi yang tepat dalam toleransi yang ditentukan. Prosedur metode iterasi lambda konvergen dengan cepat untuk jenis optimasi ini. Metode Newton-Raphson juga dapat digunakan untuk membuat skema nilai biaya tambahan untuk mencapai kesalahan antara generasi yang dihitung dan yang diinginkan menjadi nol.



Gambar 5 Penjadwalan ekonomis dengan metode iterasi Lambda [14]

B. Metode Gradien

Metode dasar lain untuk pengiriman ekonomi adalah metode gradien. Metode gradien bekerja pada aturan bahwa fungsi minimum, $f(x)$, dapat dihitung dengan serangkaian langkah yang selalu diambil dalam arah ke bawah. Dalam kasus pengiriman ekonomi, fungsi minimumnya adalah

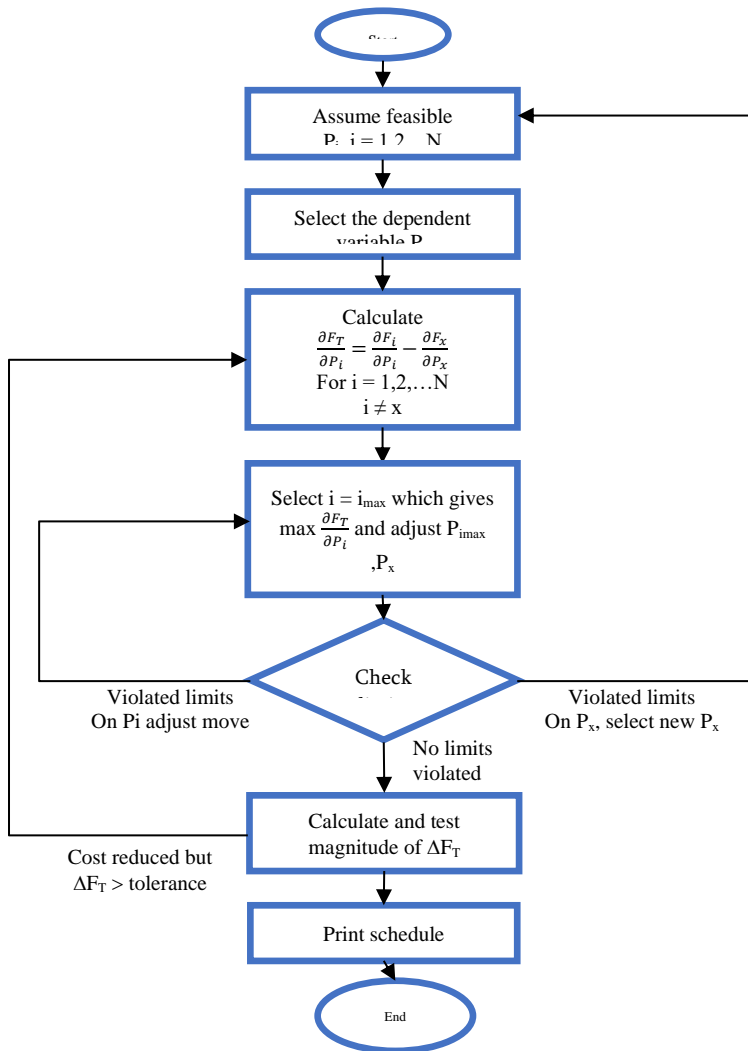
$$f = \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi})$$

Dengan fungsi kendala:

$$\varepsilon = \left(P_D - \sum_{i=1}^N P_{Gi} \right)$$

Untuk memecahkan masalah pengiriman ekonomi, metode gradien diterapkan langsung ke fungsi LaGrange, sambil meminimalkan fungsi tujuan dan mempertahankan kendala kesetaraan, oleh karena itu

$$\mathcal{L}(P_{Gi}, \lambda) = \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi}) + \lambda \left(P_D - \sum_{i=1}^N P_{Gi} \right)$$



Gambar 6 Penjadwalan Ekonomis dengan Metode Gradien [14]

C. Metode Newton

Metode Newton untuk fungsi lebih dari satu variabel dapat dijelaskan sebagai berikut.

Mari kita asumsikan untuk mengarahkan fungsi $g(x)$ ke nol, di mana \mathbf{g} dan \mathbf{x} adalah vektor. Dengan menggunakan metode Newton:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}) + [g'(\mathbf{x})] \Delta\mathbf{x} = 0$$

di mana

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, x_3) \\ g_2(x_1, x_2, x_3) \\ g_3(x_1, x_2, x_3) \end{bmatrix}$$

Dan

$$g'(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

Penyesuaian pada setiap langkah menjadi

$$\Delta\mathbf{x} = -[g'(\mathbf{x})]^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x})$$

Dengan membiarkan g fungsi menjadi vektor gradien $\nabla\mathcal{L}_{\mathbf{x}}$, kita memperoleh

$$\Delta\mathbf{x} = -\left[\frac{\partial}{\partial\mathbf{x}}\nabla\mathcal{L}_{\mathbf{x}}\right]^{-1} \Delta\mathcal{L}$$

BAB 3

METODE ALIRAN DAYA OPTIMAL

3.1 ALIRAN DAYA OPTIMAL

3.1.1 *Konsep Dasar*

Perkembangan pasar listrik di seluruh dunia telah membawa tantangan baru bagi komunitas ilmiah, para pemain, dan otoritas pengatur. Salah satu tantangan tersebut adalah ketidakpastian yang menjadi elemen struktural dalam lingkungan baru ini [15]. Semua pelaku pasar harus mampu menghadapinya untuk menjamin perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik yang tepat serta likuiditas ekonominya sendiri [16]. Alat yang diterima dengan baik yang digunakan untuk mengendalikan dan menilai operasi sistem tenaga yang tepat dan aman adalah aliran daya optimal (OPF).

Teknik pengiriman ekonomis ini sudah diterapkan di banyak sistem manajemen energi (EMS) tetapi memiliki beberapa kendala keamanan. Konsep aliran daya optimal didefinisikan oleh Carpentier pada tahun 1962 [14] sebagai perpanjangan dari pengiriman kekuatan ekonomi tradisional untuk menyelesaikan pengaturan optimal untuk variabel kontrol sambil mempertimbangkan

3.1.2 Fungsi Tujuan dan Batasan dalam OPF

Saat ini, aliran daya yang optimal menjadi lebih penting karena ukuran sistem tenaga meningkat dan interkoneksi menjadi lebih rumit. Masalah OPF umum diajukan sebagai meminimalkan tujuan umum $F(x, u)$ sambil memenuhi kendala tertentu.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & F(x, u) \\ \text{Kendala} \quad & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) \leq 0 \end{aligned}$$

di mana $F(x, u)$ adalah fungsi tujuan skalar, $g(x, u)$ mewakili kendala kesetaraan nonlinier (persamaan aliran daya) dan $h(x, u)$ kendala ketidaksetaraan nonlinier, batas pada variabel kontrol dan batas operasi sistem tenaga. Vektor x berisi variabel dependen seperti:

- besaran tegangan bus dan sudut fasa
- output daya reaktif generator yang dirancang untuk kontrol tegangan bus
- parameter tetap, seperti: sudut bus referensi, MW generator tidak terkontrol, MVAr dan output, beban tidak terkontrol pada tegangan tetap, parameter saluran, dan lain-lain.

vektor u terdiri dari variabel kontrol termasuk:

- pembangkit listrik aktif dan reaktif
- sudut pemindah fasa
- pertukaran bersih

- Beban MW dan MVAR (pembuangan beban)
- Aliran saluran transmisi DC
- Pengaturan keran transformator LTC
- Peralihan garis

Tabel 1 menunjukkan tujuan, kendala dan kontrol yang umum ditemukan dalam perumusan aliran daya yang optimal.

Tabel 1 Fungsi Tujuan, Kendala dan Kontrol Pada OPF [18]

Tujuan	Kendala	Kontrol
Tujuan Daya Aktif <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pengiriman ekonomis (kerugian biaya minimum, kerugian pembangkitan atau transmisi MW, meminimalkan biaya pembangkitan, ➤ Pengiriman lingkungan (meminimalkan polusi udara) ➤ Transfer daya maksimum 	Batas pada variabel Kontrol <ul style="list-style-type: none"> ➤ Output generator dalam MW ➤ Batas tap transformator ➤ Rentang kapasitor shunt ➤ Cadangan berputar ➤ Kemampuan unit MVAR 	Pembangkit listrik nyata dan reaktif Profil tegangan dan pembangkitan MVAR di bus Posisi tap transformator LTC Pergeseran fasa transformator Pertukaran bersih Kondensator sinkron, SVC, kapasitor dan bank reaktor Transfer beban
Tujuan Daya Reaktif <ul style="list-style-type: none"> ➤ Minimalkan Rugi MVAR 	Batas operasi aktif <ul style="list-style-type: none"> ➤ Persamaan aliran daya 	Aliran MW jalur HVDC pelepasan beban Peralihan garis

Prosedurnya terdiri dari metode menggunakan teknik aliran daya untuk pengiriman ekonomi sementara variabel terkendali tertentu disesuaikan untuk meminimalkan fungsi tujuan seperti biaya pembangkit listrik aktif atau rugi daya, sementara memenuhi batas fisik dan operasi pada berbagai kontrol, variabel dependen dan fungsi variabel.

Pada Bagian 2.3, konsep metode iterasi lambda, metode gradien dan metode Newton untuk pengiriman ekonomis diperkenalkan dan dianalisis. Pada bagian ini, kita akan meninjau metode Newton dan metode gradien sebagai solusi aliran daya optimal dan memperkenalkan aliran daya optimal DC. Masalah OPF dapat diselesaikan dengan menggunakan model aliran daya AC atau DC. Kata “optimal” ditujukan untuk meminimalkan total biaya operasional sistem dan memaksimalkan manfaat.

A. Aliran Daya Optimal Berdasarkan Metode Newton

Fungsi tujuan yang harus diminimalkan dalam aliran daya yang optimal adalah fungsi biaya

$$F = \sum_{i=1}^{NG} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i)$$

Dengan memperhatikan:

- Keseimbangan daya aktif di jaringan

$$P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, NB)$$

- Keseimbangan daya reaktif dalam jaringan

$$Q_i(V, \delta) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \quad (i = NV+1, NV+2, \dots, NB)$$

Kendala terkait keamanan:

- Batas pembangkit listrik nyata

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (i = 1, 2, \dots, NG)$$
- Batas besaran tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (i = NV+1, NV+2, \dots, NB)$$
- Batas sudut tegangan

$$\delta_i^{min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{max} \quad (i = 2, 3, \dots, NB)$$

Batasan fungsional yang merupakan fungsi dari variabel kontrol

- Batas daya reaktif

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (i = 1, 2, \dots, NG)$$
- Batas aliran daya aktif saluran dan aliran daya reaktif saluran dapat diterapkan:
 - Persamaan aliran daya nyata adalah

$$P_i(V, \delta) = V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\}$$

- Persamaan aliran daya reaktif adalah

$$P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad (i = NV+1, NV+2, \dots, NB)$$

$$Q_i(V, \delta) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \quad (i = NV+1, NV+2, \dots, NB)$$

dengan

$$P_i(V, \delta) = V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\}$$

dan

$$Q_i(V, \delta) = V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j \{G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\}$$

Maka himpunan persamaan yang mengatur aliran daya menjadi

$$g(x, y) = \begin{bmatrix} P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} \\ Q_i(V, \delta) - Q_{Gi} + Q_{Di} \\ P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} \end{bmatrix}$$

dimana

x adalah variabel keadaan vektor, didefinisikan sebagai

$$x = \begin{bmatrix} \delta_i \\ V_i \\ \delta_i \end{bmatrix}$$

y adalah vektor yang terdiri dari dua bagian: u yang merupakan vektor variabel kontrol dan p yang merupakan vektor parameter tetap, dan didefinisikan sebagai

C. Aliran Daya Optimal DC

Sementara beberapa penulis telah menggunakan model aliran daya ac yang lain telah menggunakan model aliran daya optimal DC. Masalah aliran beban optimal AC seperti OPF berdasarkan metode Gradien dan metode Newton, terdiri dari mencari keluaran daya aktif dan reaktif dan besaran tegangan pada setiap unit generator, untuk meminimalkan biaya operasi sambil memenuhi berbagai kendala keamanan. Sedangkan pendekatan DC OPF diterapkan untuk menghitung aliran beban dalam model, ditandai dengan mengabaikan rugi-rugi dan fokus hanya pada daya nyata. DC Optimal Power Flow (DC-OPF) adalah dengan tujuan untuk menyelesaikan kepentingan baik pemasok, yang ingin menjual energi semahal mungkin, dan pembeli, yang ingin membeli energi semurah mungkin [20] . Solusi ini banyak digunakan karena ini adalah konversi dari pendekatan AC ke masalah analisis rangkaian linier yang lebih sederhana. Meskipun menggunakan aliran daya AC penuh adalah perhitungan yang paling tepat [21-23] , namun, karena kompleksitas dan fitur non linieritasnya, mungkin mengaburkan korelasi parameter yang digunakan. Dengan demikian, pendekatan aliran daya DC lebih disukai dan telah digunakan secara luas dalam banyak literatur ketika menghitung harga nodal dan menganalisis kongesti melalui saluran transmisi [3, 24-30] .

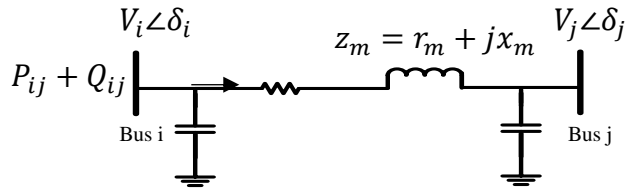
Pada [14] , model aliran daya DC dikembangkan dengan beberapa pertimbangan seperti; besaran tegangan

diasumsikan konstan pada setiap bus, sudut fasa yang berbeda dari tegangan bus antara dua bus kecil, dan resistansi transmisi sangat kecil dibandingkan dengan penerimaannya, dan oleh karena itu tidak ada rugi-rugi dalam model ini. Ini akan membangun model yang merupakan perkiraan pertama yang masuk akal untuk sistem tenaga aktif, yang hanya sedikit nonlinier dalam operasi kondisi tunak normal.

Model memiliki manfaat untuk kecepatan komputasi dan properti berguna lainnya, seperti [31] ; *fitur linearitas*, artinya arus yang dapat diatribusikan secara langsung ke setiap transaksi akan berlipat ganda jika UM dalam transaksi itu dari satu zona ke zona lain juga berlipat ganda, dan *fitur superposisi* , artinya aliran pada jaringan dapat dibagi menjadi sejumlah komponen yang masing-masing dapat diatribusikan secara langsung suatu transaksi pada sistem. Karena karakteristik khusus ini, banyak operator pasar independen telah menerapkan model tersebut ke mesin pengiriman mereka.

Pada bagian berikutnya, model aliran daya DC sebagai representasi dasar penghitungan aliran daya yang digunakan dalam mengendalikan manajemen transmisi akan dibahas.

Aliran daya pada saluran transmisi yang menghubungkan bus i ke bus j ditunjukkan pada Gambar 2.7, diberikan oleh:



Gambar 2. 1 Saluran transmisi Pi-equivalent circuit

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij} = V_i \left[\frac{V_i - V_j}{z_m} \right]^* = \frac{1}{z_m^*} [|V_i|^2 - |V_i||V_j| \angle \delta_i - \delta_j]$$

$$= \frac{1}{z_m^*} [|V_i|^2 - |V_i||V_j| \{ \cos(\delta_i - \delta_j) + j \sin(\delta_i - \delta_j) \}]$$

mengingat

$$\frac{1}{z_m^*} = \frac{1}{r_m - jx_m} = \frac{r_m + jx_m}{r_m^2 - jx_m^2} = \frac{r_m + jx_m}{|z_m|^2}$$

kemudian

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}$$

$$= \frac{r_m + jx_m}{|z_m|^2} [|V_i|^2 - |V_i||V_j| \{ \cos(\delta_i - \delta_j) + j \sin(\delta_i - \delta_j) \}]$$

- Menjumlahkan semua pembangkit yang terhubung ke bus yang sesuai dikurangi semua beban pada bus untuk mengevaluasi injeksi bus P_i di setiap bus, maka
- Mendapatkan vektor sudut fasa bus dengan mengalikan vektor injeksi bus P dengan matriks reaktansi X untuk jaringan;
- Menggunakan sudut fasa bus θ_i yang dihasilkan dari langkah sebelumnya dengan reaktansi saluran x_{ij} untuk menemukan aliran daya saluran P_{ij} , dan akhirnya
- Membandingkan nilai aliran saluran P_{ij} dengan batas termal transmisi atau batas MW saluran untuk mengetahui apakah ada bagian dari kendala jaringan yang dilanggar atau tidak.

3.2 WAKTU DAN LOKASI INVESTIGASI

Waktu investigasi yang dibutuhkan sekitar 10 bulan. Lokasi penelitian berlangsung di Pusat Penelitian dan Pengembangan Energi dan Kelistrikan, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat, Universitas Hasanuddin.

3.3 JENIS INVESTIGASI

Kajian ini adalah deskriptif yang bertujuan untuk menganalisis penentuan harga energi listrik yang optimal dan mencerminkan biaya marginal sumber pembangkitnya. Hasil implementasi diharapkan akan

terbentuk skema perhitungan harga energi listrik, model *objective function* beserta model *constraint functions*. Skema yang terbangun mengabaikan efek *losses* jaringan transmisi.

3.4 INSTRUMEN PENELITIAN

Peralatan yang dipergunakan dalam penelitian ini terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak sebagai berikut:

- a. Komputer
- b. Software pengolah data
- c. Software pemrograman dan pemodelan (*Matlab, DigSilent*)
- d. Printer

3.5 RANCANGAN PENELITIAN

Rancangan metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Literature review dilakukan dengan merujuk pada berbagai artikel terkait utamanya yang dipublikasikan melalui jurnal internasional terkemuka.

2. Pembuatan Model, Perhitungan dan Pengolahan Data

- Metode pembuatan model LMP-lossless, *objective function*, dan *constraint functions* dilakukan dengan teknik aliran daya optimal.
- Metode perhitungan yang dipakai dalam penelitian ini adalah dengan memanfaatkan *Direct Current Optimal Power Flow (DC-OPF) methodology*.
- Metode analisa data adalah dengan menggunakan data pada sistem 3 bus yang terdiri dari :
 - a. Data Pembangkitan
 - b. Data Jaringan Transmisi
 - c. Data Pembebanan Sistem

3. Analisis Hasil

Sistem yang telah disimulasikan selanjutnya dianalisis sesuai dengan skema penentuan harga energi listrik yang telah dibangun.

4. Penarikan Kesimpulan

Merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan di berikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

BAB 4

PERHITUNGAN HARGA ENERGI TANPA RUGI JARINGAN

4.1 FORMULASI MODEL OBJECTIVE FUNCTION

$$Obj = Min \sum_{i=1}^{n_G} C_i(P_{Gi}) - \sum_{j=1}^{n_D} B_j(P_{Dj}) \quad (1)$$

4.2 FORMULASI MODEL CONSTRAINT FUNCTIONS

$$* \quad P_i = \sum_{\substack{i=1 \\ (j \neq i)}}^{N_{bus}} [b_{ij}][\delta_i - \delta_j] \quad (2)$$

$$* \quad P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (i = 1, 2, \dots, NG) \quad (3)$$

$$* \quad P_{ij}(\delta) \leq P_{ij}^{max} \quad (i = 1, 2, \dots, N_{bus}) \quad (4)$$

Selanjutnya akan dihasilkan nilai LMP sebagai harga energi listrik optimal yang mencerminkan nilai biaya marginal-nya serta biaya jaringan marginal (*marginal network revenue*) (Perez-Arriaga, Rubio et al. 1995; Rudnick, Palma et al. 1995).

4.3 PEMODELAN HARGA ENERGI MENGABAIKAN RUGI-RUGI JARINGAN MENGGUNAKAN DC-OPF

Skema model *Locational Marginal Price* (LMP) tercermin dari Lagrange multiplier dan *Merchandising Surplus* (MS) terdiri atas biaya pembangkitan energi listrik, biaya kongesti transmisi. Berhubung pengaruh rugi-rugi jaringan diabaikan, maka skema ini diberi nama model *LMP-lossless*.

$$\mathbf{LMP}_{\text{lossless}} = \lambda_i$$

4.4 DIAGRAM SATU GARIS DAN DETAIL SISTEM

Skema penentuan harga energi listrik pada sistem tenaga listrik terkongesti menggunakan pendekatan metodologi *direct current based optimal power flow* (DC-OPF) diimplementasikan pada sistem 3 bus. Beberapa karakteristik penting akan dievaluasi untuk menggambarkan manfaat dari metode yang digunakan. Diagram satu garis dari sistem diperlihatkan pada Gambar 7. Detail sistem yang terdiri dari profil generator dan jaringan transmisi diberikan pada Tabel 2.

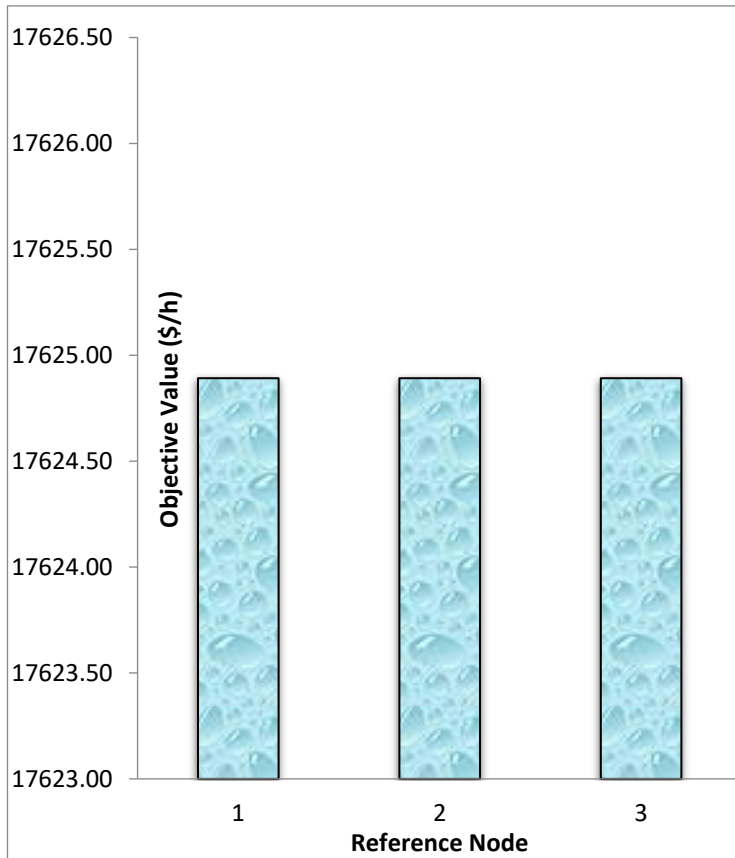
Tabel 2 Detail Generator dan Jaringan Sistem [94]

Generator Profile						
	b_i (\$/MWh)	m_i (\$/MW ² h)	$min G_i$ (MW)	$max G_i$ (MW)		
G ₁	20	0.015	150	600		
G ₂	18	0.015	50	400		
Branch Profile						
	n'	n''	r p.u.	x p.u.	cap (MW)	α_m (\$/MWh)
L1	1	2	0.0134	0.1335	200	2
L2	1	3	0.0067	0.0665	550	1
L3	2	3	0.0084	0.1002	350	1.25

4.5 ANALISIS HASIL IMPLEMENTASI

Simulasi penentuan harga energi pada sistem 3 bus dilakukan menggunakan metode DC-OPF. Skema LMP-lossless yang telah dibuat yaitu dengan memperhitungkan harga energi dan faktor kongesti transmisi dalam menentukan akhir harga LMP (*Locational Marginal Price*) pada titik optimal.

Seluruh hasil simulasi yang diperoleh untuk model LMP-lossless ini diilustrasikan pada Gambar 8 - 11. Gambar 8 memperlihatkan nilai *objective cost* yang diperoleh untuk semua kemungkinan titik bus referensi. Pada saat Bus 1 dipilih sebagai titik referensi, *objective cost* yang dihasilkan sebesar \$17625/h. Nilai yang sama juga dihasilkan ketika bus referensi mengalami perubahan baik ke Bus 2 maupun ke Bus 3. Hal ini menandakan bahwa metode DC-OPF meskipun merupakan fungsi dari sudut fasa, akan tetapi tidak tergantung pada pilihan bus referensi. Sebagaimana diketahui, penentuan bus referensi pada satu titik bus tertentu akan membuat *voltage phase angle* pada bus tersebut disetting pada posisi 0° . Namun mengingat selisih sudut fasa bus tersebut terhadap sudut fasa pada bus lain relative sangat kecil, mengakibatkan nilai akhir yang ditunjukkan oleh bus referensi lain tidak mengalami perubahan signifikan.



Gambar 8 *Objective Cost* Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless* Menggunakan metode DC-OPF

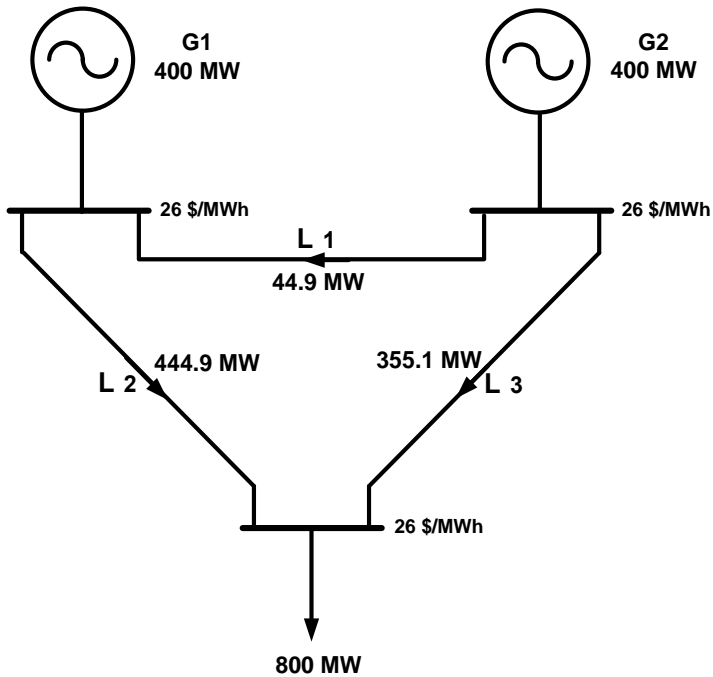
merchandising surplus yang diperoleh sekitar \$1845/h. Demikian pula pada saat bus referensi mengalami perubahan ke Bus 2 atau ke Bus 3, besar nilai *merchandising surplus* tidak mengalami perubahan.

Hasil yang ditunjukkan baik pada Gambar 8 maupun Gambar 9 memberi indikasi bahwa penerapan metode DC-OPF tidak tergantung pada pemilihan bus referensi untuk mendapatkan nilai *objective cost* maupun *merchandising surplus*. Dengan demikian titik bus referensi dapat ditentukan dimana saja, namun umumnya biasanya ditempatkan pada bus yang terkoneksi dengan pembangkit terbesar.

Gambar 10 dan 11 memperlihatkan aliran daya pada sistem 3 bus dengan mengabaikan efek *losses* jaringan. Skema aliran daya tanpa kendala jaringan diilustrasikan pada Gambar 10. Pada kondisi ini, nampak bahwa garis transmisi *L1* mengalirkan daya sebesar 44.9 MW, sementara garis transmisi *L2* dan *L3* masing-masing mengalirkan daya sebesar 444.9 MW dan 355.1 MW untuk memenuhi beban sistem sebesar 800 MW. Tidak terdapatnya kongesti transmisi mengakibatkan harga energi listrik optimal di setiap titik bus seragam yakni sebesar \$26/MWh. Harga seragam ini dikenal dengan istilah *uniform marginal price* (UMP).

Pada saat jaringan transmisi diberi kendala seperti tampak pada Gambar 11, terjadi perubahan besar aliran daya di setiap garis transmisi. Garis transmisi *L1* mengalirkan daya sebesar 38.54 MW, sementara garis transmisi *L2* dan

L3 masing-masing mengalirkan daya sebesar 450 MW dan 350 MW. Terjadi kongesti transmisi pada garis transmisi L3 sebesar 350 MW. Hal ini mengakibatkan terjadinya perbedaan harga energi di setiap titik bus. Harga optimal energi listrik di Bus 1 harus mengalami penyesuaian seiring dengan perubahan komposisi pembangkitan daya listrik di setiap generator untuk menjaga agar "*security constraint*" dari sistem tidak dilanggar. Dengan terjadinya kongesti transmisi, mengakibatkan titik optimal harga energi listrik sekarang menjadi: \$26.172/h di Bus 1, \$23.828/h di Bus 2, dan \$27.339/h di Bus 3. Harga yang tidak seragam untuk setiap lokasi titik bus inilah yang kemudian dikenal dengan istilah *locational marginal price* (LMP).



Gambar 10 Aliran Daya Tanpa Kendala Sistem 3-Bus Model *LMP-lossless*

BAB 5

PENUTUP

5.1 RINGKASAN UNJUK KINERJA

Hasil unjuk kinerja dari penerapan metode analisis harga energi listrik kompetitif tanpa rugi jaringan dengan berbasis pada teknik *Direct Current Optimal Power Flow* ini memberikan beberapa ringkasan capaian sebagai berikut:

- Investigasi terhadap penentuan harga energi optimal telah dilakukan dengan menggunakan teknik aliran daya optimal DC, yang lebih dikenal dengan istilah metode *DC Optimal Power Flow*.
- Skema harga energi listrik dilakukan dengan mengabaikan efek rugi-rugi/ *losses* jaringan.
- Penelitian dilakukan dengan dua situasi utama, yakni kondisi jaringan terkendala dan tidak terkendala.
- Hasil penelitian membuktikan bahwa untuk kondisi jaringan yang tidak terkendala, harga energi listrik optimal seragam di setiap titik bus.
- Hasil penelitian berikutnya menunjukkan bahwa untuk kondisi jaringan yang terkendala, dimana salah

satu cabang jaringan transmisi mengalami kongesti, menyebabkan harga energi listrik mengalami perubahan dan tidak seragam di semua titik bus.

5.2 REKOMENDASI

Adapun beberapa saran dan rekomendasi terkait dengan analisis harga energi yang perlu mendapat perhatian agar unjuk kinerja yang dicapai dapat lebih optimal adalah sebagai berikut:

- Formulasi model harga energi listrik optimal dengan skema pengabaian rugi jaringan ini memanfaatkan metode *direct current optimal power flow*. Mengingat metode ini merupakan metode konvensional dan klasik, sangat direkomendasikan untuk menguji coba atau mengembangkan model harga energi ini dengan teknik pendekatan lain sebagai alternatif metode selain yang telah ada.
- Perlu dilakukan penelitian selanjutnya untuk menganalisis lebih jauh penyebab terjadinya perbedaan harga energi listrik optimal pada kondisi antara jaringan tanpa kendala dan jaringan dengan kendala.
- Analisis yang diterapkan sejauh ini dilakukan dengan mengabaikan efek rugi-rugi/ *losses* jaringan. Untuk itu perlu dilakukan kajian terkait dengan pengembangan model dan teknik formulasi agar faktor *losses* dapat pula diperhitungkan ke dalam penentuan harga energi yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Shangyou, "Decentralized approach to intermarket congestion management," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 675-683, 2005.
- [2] H. Shangyou and Z. Fulin, "New models for integrated short-term forward electricity markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 478-485, 2003.
- [3] W. W. Hogan, "Independent System Operator: Pricing and Flexibility In A Competitive Electricity Market," John F. Kennedy School of Government, Harvard University, Cambridge, Massachusetts February 1998.
- [4] R. D. Tabors, "Lessons from the UK and Norway," *Spectrum, IEEE*, vol. 33, pp. 45-49, 1996.
- [5] R. D. Tabors and S. Adamson, "Price Discrimination in Organized/Centralized Electric Power Markets," in *System Sciences, 2006. HICSS '06. Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on*, 2006, pp. 247c-247c.
- [6] Center-Point-Energy, "How We Deliver Electricity." vol. 17 October 2008: [online] Available:
<http://www.centerpointenergy.com/services/electricity/residential/powerqualityandreliability/howwedeliverelectricity/>, 2008.

INDEKS

A

AC · 26, 32

aktif · 21, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 32, 33,
35

angle · 45

B

bahan · 3, 5, 9

bakar · 5, 9, 12

batubara · 8

beban · 4, 5, 9, 10, 20, 22, 23, 28, 32,
37, 48

biaya · 1, 2, 5, 7, 9, 12, 20, 21, 23, 25,
26, 28, 29, 31, 32, 37, 42

bus · 1, 9, 20, 21, 22, 23, 28, 29, 31, 33,
35, 36, 37, 39, 42, 43, 45, 47, 48,
49, 53, 54, 65

C

cadangan · 20, 23

constraint functions · 37, 38

current · 2, 42, 54

D

daya · 1, 3, 4, 5, 9, 19, 20, 21, 22, 23,
25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33,
35, 36, 37, 38, 48, 53

DC · 2, 9, 23, 26, 32, 33, 39, 42, 45, 46,
47, 48, 53, 57, 65

direct · 2, 42

dispatch · 56, 62

distribusi · 4, 5, 6

E

efisien · 2, 4

efisiensi · 6, 7

EMS · 19

energi · 1, 2, 4, 7, 9, 11, 19, 32, 37, 39,
42, 45, 48, 49, 53, 54

energy · 9, 58, 62, 65, 69

F

flow · 2, 9, 42, 54, 57, 58

fosil · 12

fungsi · 5, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 21, 22,
26, 27, 29, 31, 36, 45

G

gas · 8

generator · 4, 5, 9, 22, 23, 28, 32, 43, 49

gradien · 14, 15, 17, 26, 29

gross · 8

H

harga · 1, 2, 7, 9, 32, 37, 39, 42, 45, 48,
49, 53, 54

I

infrastruktur · 5

injeksi · 28, 36, 37

input · 8, 10

investasi · 7

J

jaringan · 1, 2, 3, 4, 10, 26, 29, 33, 37,
38, 42, 43, 48, 53, 54

K

kapasitas · 20

kelistrikan · 2, 5, 6

keluaran · 1, 5, 8, 9, 10, 32

kendala · 1, 5, 10, 11, 14, 19, 20, 21, 22,
23, 25, 32, 37, 48, 54

kerja · 7, 9

ketenagalistrikan · 3, 5, 7, 9

kompetitif · 1, 7, 8, 53

PROFIL PENULIS



MUHAMMAD BACHTIAR NAPPU meraih gelar Sarjana Teknik dengan predikat *Cum Laude* dari Universitas Hasanuddin pada tahun 1999 dan gelar Magister Teknik dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2001. Sejak 2007, dia melanjutkan pendidikan di The University of Queensland, Brisbane, Australia di bidang *Power Systems Engineering and Competitive Electricity Market* dan berhasil menyabet gelar M.Phil dan Ph.D masing-masing pada tahun 2009 dan 2013.

Dr Bachtiar telah menerbitkan lebih dari 100 publikasi dalam bentuk laporan penelitian, buku, makalah jurnal dan artikel konferensi internasional. Pada tahun 2019, ia dianugerahi sebagai tokoh akademisi berprestasi kategori Sains dan Teknologi oleh Rektor Universitas Hasanuddin. Menjabat sebagai Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Energi dan Ketenagalistrikan tahun 2015-2022, ia terlibat dalam sejumlah proyek infrastruktur ketenagalistrikan dengan mitra utama Perusahaan Listrik Negara Indonesia, PT PLN (Persero).

Dalam lima tahun terakhir, Dr Bachtiar juga bekerja sebagai konsultan senior *The United States Agency for International Development (USAID)* untuk mendukung program *Indonesian Clean Energy Development (ICED)* dan proyek *Scaling-Up Renewable Energy (SURE)* di Indonesia.

Beliau juga menjabat sebagai konsultan senior untuk *Asian Development Bank* (ADB) untuk memberikan technical assistance dalam mendukung proyek akses energi listrik yang berkelanjutan dan universal di Indonesia sebagai bagian dari program pengembangan jaringan ketenagalistrikan untuk pulau Sumatera, Kalimantan, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku dan Papua.

Saat ini Dr Bachtiar terlibat sebagai mitra peneliti dalam proyek penelitian kolaboratif internasional dengan lembaga riset dan industri terkemuka Australia melalui program *Reliable, Affordable, Clean Energy for 2030* (RACE for 2030). Minat penelitiannya meliputi operasi dan analisis sistem tenaga listrik, peramalan, perencanaan dan integrasi energi terbarukan serta optimalisasi pasar ketenagalistrikan yang kompetitif.

Analisis Harga Energi Listrik Kompetitif Tanpa Rugi Jaringan Dengan Teknik *Direct Current* *Optimal Power Flow*

Buku referensi ini bertujuan mengkaji perspektif baru dalam penentuan harga optimal energi listrik yang sesuai dengan biaya marginal dan mencerminkan tingkat keekonomian sumber pembangkitnya.

Mengingat kendala yang terdapat pada jaringan transmisi akan menyebabkan bertambah mahal biaya pembangkitan, sebuah pendekatan berbeda akan diterapkan dengan harapan didapatkannya biaya marginal energi listrik yang optimal. Untuk mencapai level optimal ini, pendekatan yang ditempuh adalah dengan memanfaatkan metodologi *direct current optimal power flow* (DC-OPF) yang berbasis pada biaya marginal dalam bentuk minimisasi biaya produksi dan biaya sosial. Untuk kesederhanaan model yang dikembangkan, skema yang dibentuk mengabaikan efek rugi-rugi (*losses*) jaringan transmisi dengan mengambil studi kasus pada model jaringan tiga bus.

TOHAR MEDIA

No Anggota IKAPI : 022/SSL/2019
Workshop : JL. Rappocini Raya Lr.II A No 13 Kota Makassar
Redaksi : JL. Muhktar dg Tompo Kabupaten Gowa
Perumahan Nayla Regency Blok D No 25
Telp. (0411) 8987659 Hp. 085299993635
<https://toharmedia.co.id>

ISBN 978-623-8148-55-4

