

STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATERA BAGIAN UTARA (SUMBAGUT) 150 kV DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE POWERWORLD VERSI 17

Adly Lidya, Yulianta Siregar

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: adly_1@yahoo.com

Abstrak

Studi aliran daya dilakukan untuk mengetahui profil tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif serta rugi-rugi jaringan pada masing-masing busbar yang bermanfaat dalam operasional sistem kelistrikan. Pada tulisan dibahas mengenai studi aliran daya pada sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara (SUMBAGUT) 150 kV pada kondisi normal saat seluruh pembangkit dan seluruh beban yang ada beroperasi dengan menggunakan *Software PowerWorld Simulator* versi 17 dengan metode analisisnya menggunakan metode *Newton-Rhapson*. Hasil studi aliran daya yang diperoleh untuk sistem dalam kondisi normal adalah tegangan bus paling rendah di Bus Rantau Prapat yaitu sebesar 139,670 kV. Total daya pembangkit adalah sebesar 2509.3 MW dan 2030.7 MVar. Total daya beban adalah sebesar 2456 MW dan 1834 MVar. Total rugi-rugi jaringan adalah sebesar 53.3 MW dan 196.7 MVar dengan nilai rugi-rugi jaringan tertinggi yaitu pada transmisi Sei Rotan – Tebing Tinggi sebesar 8.82 MW dan 29.62 MVar.

Kata Kunci: aliran daya, newton-rhapson, powerworld simulator

1. Pendahuluan

Studi aliran daya merupakan studi yang mengungkapkan kinerja dan aliran daya (nyata dan reaktif) untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja. Studi aliran daya memberikan informasi mengenai beban saluran transmisi, losses, dan tegangan di setiap lokasi untuk evaluasi kinerja sistem tenaga listrik. Oleh sebab itu studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa yang akan datang.

Untuk menunjang bertambahnya konsumsi energi listrik harus diimbangi dengan peningkatan kualitas energi listrik. Caranya dengan melakukan analisis terhadap suatu sistem energi listrik. Pada sistem tenaga listrik perlu dilakukan beberapa analisis seperti analisis aliran daya, analisis stabilitas dan analisis hubung singkat. Analisis aliran daya dilakukan pada sistem tenaga dalam keadaan beroperasi normal untuk keperluan menentukan besar tegangan dan daya pada tiap busbar.

Dengan studi aliran daya ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan operasional sistem tenaga listrik serta pengembangan sistemnya untuk lebih

meningkatkan kualitas energi listrik, khususnya di wilayah Sumatera Bagian Utara.

2. Persamaan Aliran Daya

Sistem Tenaga Listrik terdiri dari Pusat Pembangkit, Jaringan Transmisi, Gardu Induk, Jaringan Distribusi, dan Beban seperti yang ditunjukkan Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Single line diagram sistem tenaga listrik secara sederhana

Pada pusat pembangkit terdapat generator dan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*). Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi Listrik yang dibangkitkan tersebut dinaikkan level tegangan pada Gardu Induk Transmisi oleh transformator penaik tegangan untuk mengurangi rugi-rugi daya transmisi. Setelah dinaikkan kemudian energi listrik dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Setelah energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah energi listrik di

Gardu Induk Distribusi untuk diturunkan level tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) menjadi tegangan menengah maupun tegangan rendah. Setelah itu energi listrik akan disalurkan melalui saluran distribusi menuju pusat-pusat beban [1].

Komponen Utama dari suatu sistem tenaga pada umumnya terdiri dari generator, saluran transmisi, transformator dan beban. Komponen-komponen utama tersebut diganti dengan rangkaian pengganti agar dapat dilakukan analisis pada sistem tenaga listrik. Rangkaian pengganti yang digunakan adalah rangkaian pengganti satu fasa dengan nilai fasa netralnya. Dengan asumsi sistem 3 fasa yang dianalisis dalam keadaan seimbang dan kondisi normal. Untuk mempresentasikan suatu sistem tenaga listrik digunakan diagram yang disebut diagram segaris (*single line diagram*). Diagram segaris berisi informasi yang dibutuhkan mengenai sistem tenaga tersebut.

Pada studi aliran daya, perhitungan aliran dan tegangan sistem dilakukan pada terminal tertentu atau bus tertentu. Bus-bus pada studi aliran daya dibagi dalam 3 macam, yaitu:

1) Bus Beban

Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga disebut bus PQ . Daya aktif dan reaktif yang dicatu ke dalam sistem tenaga bernilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang di konsumsi bernilai negatif. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah V (tegangan) dan δ (sudut beban) [2][5].

2) Bus Generator

Bus Generator dapat disebut dengan *voltage controlled bus* karena tegangan pada bus ini dibuat selalu konstan atau bus dimana terdapat generator. Pembangkitan daya aktif dapat dikendalikan dengan mengatur penggerak mula (*prime mover*) dan nilai tegangan dikendalikan dengan mengatur eksitasi generator. Sehingga bus ini sering juga disebut dengan PV bus. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah Q (daya reaktif) dan δ (sudut beban) [2][5].

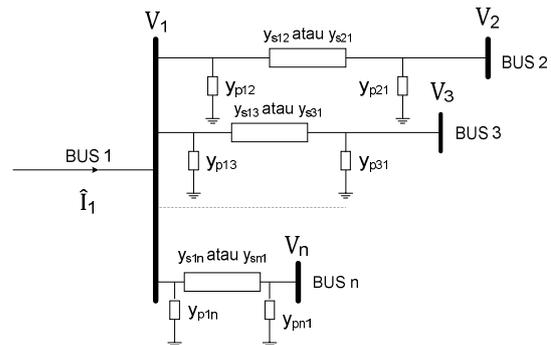
3) Slack Bus

Slack Bus sering juga disebut dengan *swing bus* atau bus berayun. Slack bus berfungsi untuk menyuplai daya aktif P dan daya reaktif Q . Besaran yang diketahui dari slack bus adalah

tegangan V dan sudut beban δ . Suatu sistem tenaga biasanya dirancang memiliki bus ini yang dijadikan sebagai referensi yaitu besaran $\delta = 0^0$. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif P dan daya reaktif Q [2][5].

Rumus umum aliran daya adalah

$$S_i = \hat{V}_i \hat{I}_i^* = (P_i + jQ_i) \Rightarrow (P_i - jQ_i) = \hat{V}_i^* \hat{I}_i \dots\dots(1)$$



Gambar 2. Model transmisi pi ntuk sistem bus

$$\hat{I}_1 = \hat{V}_1 y_{p12} + \hat{V}_2 y_{p13} + \dots + \hat{V}_n y_{p1n} + (\hat{V}_1 - \hat{V}_2) y_{s12} + (\hat{V}_1 - \hat{V}_3) y_{s13} + \dots + (\hat{V}_1 - \hat{V}_n) y_{s1n}$$

$$\hat{I}_1 = (y_{p12} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + \dots + y_{s1n}) \hat{V}_1 - y_{s12} \hat{V}_2 - y_{s13} \hat{V}_3 - \dots - y_{s1n} \hat{V}_n$$

$$\hat{I}_1 = Y_{11} \hat{V}_1 + Y_{12} \hat{V}_2 + Y_{13} \hat{V}_3 + \dots + Y_{1n} \hat{V}_n$$

$$\hat{I}_1 = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \hat{V}_j \dots\dots\dots(2)$$

Dengan:

$$Y_{11} = (y_{p12} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + \dots + y_{s1n})$$

$$Y_{12} = -y_{s12}; Y_{13} = -y_{s13}; Y_{1n} = -y_{s1n}$$

Substitusi Persamaan (2) ke Persamaan (1) menjadi:

$$P_i - jQ_i = \hat{V}_i^* I_i = \hat{V}_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \hat{V}_j; \text{ untuk nilai } i=1,2,\dots,n \dots\dots\dots(3)$$

Persamaan (3) dapat menghasilkan matriks rel admittansi seperti pada Persamaan (4), yaitu :

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \vdots \\ \hat{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \\ \vdots \\ \hat{V}_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

Persamaan (2) bila ditulis dalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(5)$$

Daya kompleks pada bus I adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

$$V_i^* = \text{conjugate dari } V_i = |V_i| \angle -\delta_i$$

Substitusi dari Persamaan (5) ke Persamaan (6) sehingga menjadi:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(7)$$

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

$$e^{j(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)} \cong \cos^{(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)} + j \sin^{(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)}$$

Dari Persamaan (7) dan (8) dapat diketahui persamaan daya aktif dan persamaan daya reaktif yaitu sebagai berikut:

$$P_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots(9)$$

$$Q_i^{(k)} = -\sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan (9) dan (10) merupakan langkah awal perhitungan aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson*. Penyelesaian aliran daya menggunakan proses iterasi (k+1). Untuk iterasi pertama (1), nilai k = 0, merupakan nilai perkiraan awal (*initial estimate*) yang ditetapkan sebelum dimulai perhitungan aliran daya.

Hasil perhitungan aliran daya menggunakan Persamaan (9) dan (10) akan diperoleh nilai $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$. Hasil nilai ini digunakan untuk menghitung nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ menggunakan persamaan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,sch} - P_{i,cal} \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,sch} - Q_{i,cal} \dots\dots\dots(12)$$

Dibentuk Persamaan matriks Jacobian setelah disederhanakan menjadi seperti persamaan di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 J_2 \\ J_3 J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(13)$$

Besaran elemen matriks Jacobian Persamaan (13) adalah:

1. J1

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = -|V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots(14)$$

2. J2

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = |Y_{ij}| |V_i^{(k)}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots(15)$$

3. J3

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = -|V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots(16)$$

4. J4

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = -|Y_{ij}| |V_i^{(k)}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots(17)$$

Setelah nilai matriks Jacobian dimasukkan ke dalam Persamaan (13), maka nilai $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dapat dicari dengan menginverskan matrix Jacobian seperti pada Persamaan (18).

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 J_2 \\ J_3 J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(18)$$

Setelah nilai $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$ diketahui nilainya, maka nilai $\delta_i^{(k+1)}$ dan $|V_i^{(k+1)}|$ dapat dicari dengan memasukkan nilai $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$ ke dalam persamaan:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots(19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots(20)$$

Nilai $\Delta \delta_i^{(k+1)}$ dan $\Delta |V_i^{(k+1)}|$ hasil perhitungan dari Persamaan (19) dan (20) merupakan perhitungan pada iterasi pertama. Nilai ini digunakan kembali untuk perhitungan iterasi ke-2 dengan cara memasukkan nilai ini ke dalam Persamaan (11) dan (12) sebagai langkah awal perhitungan aliran daya. Perhitungan dilanjutkan sampai iterasi ke-n dan akan selesai jika nilai $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta V_i^{(k)}$ konvergen setelah mencapai nilai ketelitian iterasi (ϵ) yang

ditetapkan $\{[\delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \leq \varepsilon]$ dan $[|V_i^{(k+1)} - |V_i^{(k)}| \leq \varepsilon]$ [2-5][6].

3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan metode Newton-Rhapson. Penelitian dilaksanakan mulai dari bulan April 2014 sampai bulan Juni 2014 dan untuk lokasi yang ditinjau adalah sistem kelistrikan 150 KV Sumatera Bagian Utara.

Penelitian ini memerlukan alat dan bahan yaitu sebagai berikut :

1. Laptop
2. *Software* PowerWorld Simulator versi 17
3. Data Sistem Pembangkit dan Penyalur Sumatera Bagian Utara

Langkah-langkah penelitian yang ditempuh dalam penelitian ini meliputi:

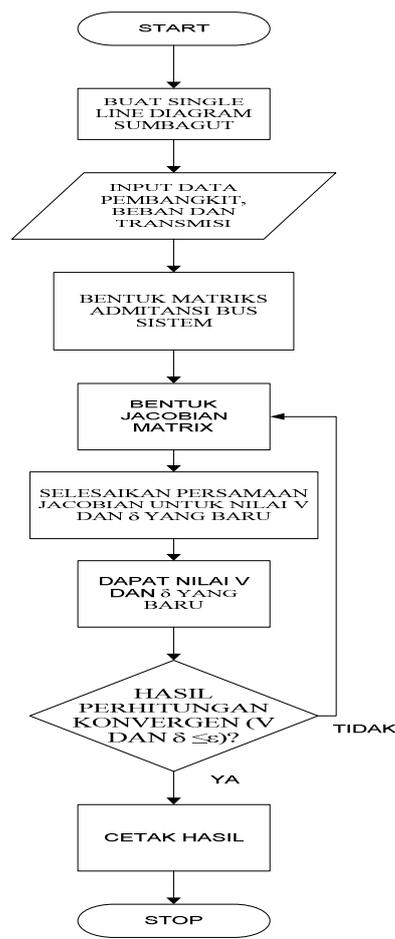
1. Tahap Persiapan

Tujuan dari tahap persiapan penelitian adalah untuk mempersiapkan dan mengumpulkan informasi berupa data-data yang diperlukan untuk melakukan analisis. Data-data tersebut meliputi daya aktif dan reaktif masing-masing busbar, impedansi saluran transmisi yang menghubungkan masing-masing busbar dan diagram satu garis sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara.

2. Tahap Perhitungan Data

Perhitungan data dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* PowerWorld Simulator versi 17 untuk mendapatkan aliran dayanya.

Analisis dilakukan dengan melihat dan membandingkan nilai tegangan, daya aktif, daya reaktif serta rugi-rugi jaringan pada masing-masing busbar. Pada Gambar 3 ditunjukkan *flowchart* untuk proses perhitungan aliran daya dengan menggunakan *software* PowerWorld Simulator versi 17.



Gambar 3. Diagram Alir Metode Newton-Rhapson

4. Hasil dan Analisis

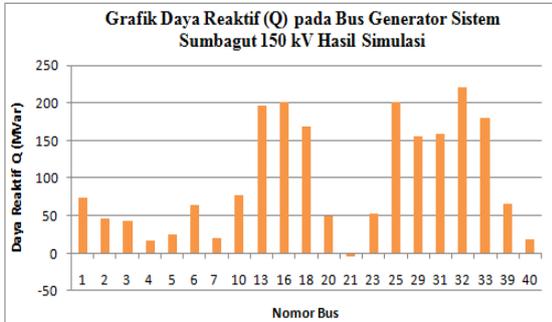
PowerWorld Simulator adalah *software* / perangkat lunak untuk simulasi ketenagalistrikan khususnya untuk analisis sistem tenaga listrik yang didesain dan dikembangkan secara berkesinambungan sehingga penggunaannya menjadi sangat *user-friendly* dan interaktif [7].

Perhitungan dilakukan dalam keadaan normal saat seluruh beban dan seluruh pembangkit yang ada beroperasi. Sebelum dilakukan perhitungan terlebih dahulu dilakukan pengaturan tingkat ketelitian iterasi (MVA Convergen Tolerance) dan jumlah iterasi maksimumnya. Pengaturan MVA Convergen Tolerance yaitu sebesar 0.0001 dengan jumlah iterasi maksimum adalah 1000. Untuk Swing bus dipilih Bus Titi Kuning sebagai referensi.

Perhitungan dengan menggunakan metode *Newton-Rhapson* selesai pada iterasi ke 4 dalam waktu 0.016 detik. Hasil perhitungan aliran daya dengan menggunakan PowerWorld Simulator dibagi berdasarkan jenis busnya.

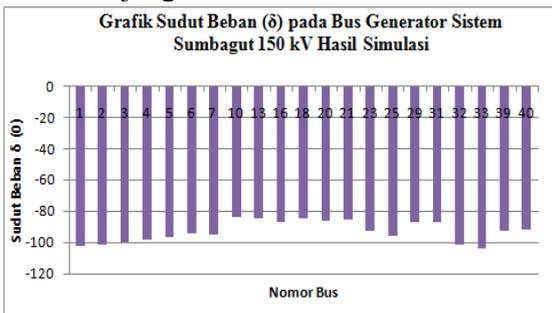
4.1 Hasil perhitungan aliran daya pada Bus Generator

Pada Bus Generator, studi aliran daya dilakukan dengan menghitung nilai daya reaktif dan sudut beban pada sistem kelistrikan SUMBAGUT 150 kV.



Gambar 4. Grafik Daya Reaktif (Q) pada Bus Generator Hasil Simulasi

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa nilai daya reaktif tertinggi yaitu sebesar 221.3 MVar terdapat pada pembangkit di bus 32, yaitu Bus Kuala Tanjung.

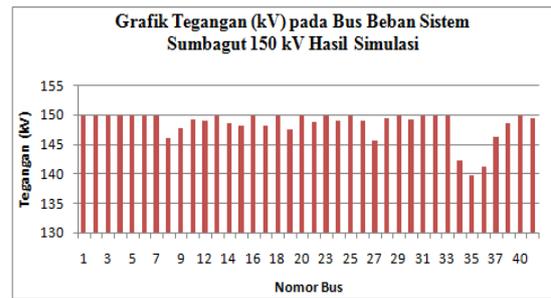


Gambar 5. Grafik Sudut Beban (δ) pada Bus Generator Hasil Simulasi

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai sudut beban pada bus generator bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa generator bersifat lagging.

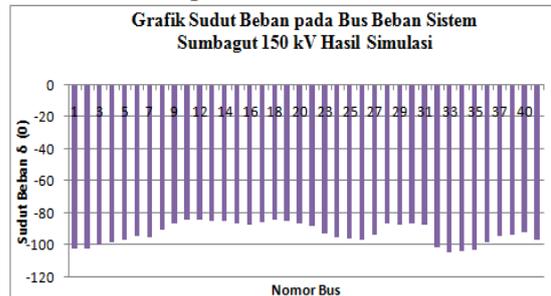
4.2 Hasil perhitungan aliran daya pada Bus Beban

Pada Bus Beban, studi aliran daya dilakukan dengan menghitung nilai tegangan dan sudut beban pada sistem kelistrikan SUMBAGUT 150 kV.



Gambar 6. Grafik Tegangan (kV) pada Bus Beban Hasil Simulasi

Dari Gambar 6 menunjukkan bahwa tegangan terendah terjadi pada Bus 35, yaitu Bus Rantau Prapat sebesar 139.670 kV.

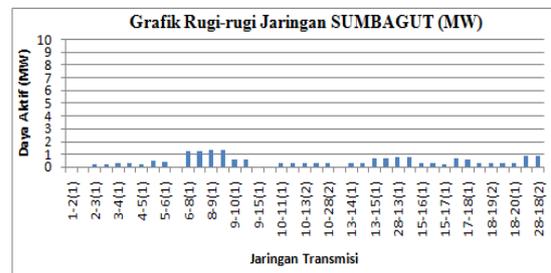


Gambar 7. Grafik Sudut Beban (δ) pada Bus Beban Hasil Simulasi

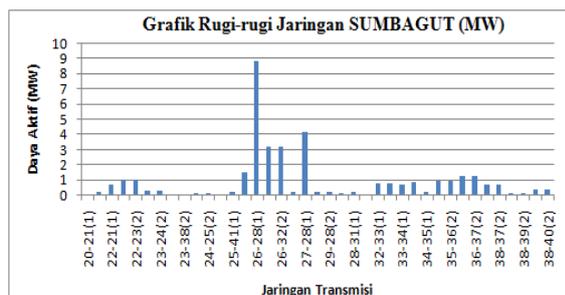
Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa nilai sudut beban pada bus beban bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa beban bersifat lagging.

4.3 Hasil perhitungan aliran daya pada jaringan transmisi

Pembebanan penghantar SUTT 150 kV yang terbesar terdapat pada jaringan transmisi Sei Rotan – Perbaungan dengan daya yang mengalir sebesar 121.3 MVA dari 167.5 MVA (73%). Untuk total rugi-rugi jaringan adalah sebesar 53.3 MW dan 196.7 MVar.

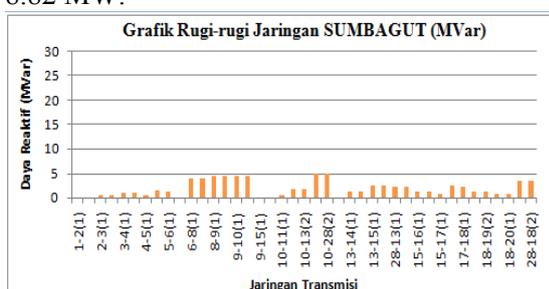


Gambar 8a. Grafik MW Loss hasil simulasi

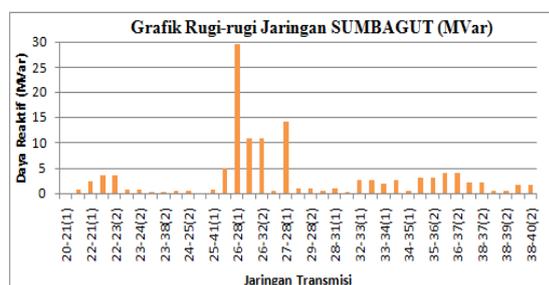


Gambar 8b. Grafik MW Loss hasil simulasi

Dari Gambar 8a dan Gambar 8b dapat diketahui bahwa nilai rugi-rugi jaringan (MW) tertinggi terdapat pada Jaringan Transmisi 26 – 28, yaitu Sei Rotan – Tebing Tinggi sebesar 8.82 MW.



Gambar 9a. Grafik MVar Loss hasil simulasi



Lanjutan Gambar 9b. Grafik MVar Loss hasil simulasi

Dari Gambar 9a dan Gambar 9b dapat diketahui bahwa nilai rugi-rugi jaringan (MVar) tertinggi terdapat pada Jaringan Transmisi 26 – 28, yaitu Sei Rotan – Tebing Tinggi sebesar 29.62 MVar. Secara keseluruhan total daya pembangkit adalah sebesar 2509.3 MW dan 2030.7 MVar. Sedangkan Total daya beban adalah sebesar 2456 MW dan 1834 MVar.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa perhitungan yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Tegangan terendah terjadi pada Bus Rantau Prapat yaitu sebesar 139.670 kV. Hal ini karena bus terletak jauh dari sumber

pembangkit meskipun masih sesuai dengan standar PLN, yaitu -10% s/d +5%.

2. Daya nyata dan daya reaktif terbesar yang mengalir sebesar 165.1 MW dan 62.1 MVar dari Sei Rotan – Tebing Tinggi. Hal ini karena beban pada Bus Tebing Tinggi dan Bus Kuala Tanjung yang terlalu besar sehingga membutuhkan pasokan daya dari Sei Rotan – Tebing Tinggi untuk memenuhi kekurangan daya tersebut.
3. Pembebanan penghantar SUTT 150 kV yang paling besar terdapat pada SUTT 150 kV Sei Rotan – Perbaungan sebesar 121.3 MVA dari 167.5 MVA (73%).
4. Nilai rugi-rugi jaringan tertinggi terjadi pada Jaringan Transmisi Sei Rotan – Tebing Tinggi dengan nilai 8.82 MW dan 29.62 MVar.
5. Total daya pembangkit adalah sebesar 2509.3 MW dan 2030.7 MVar.
6. Total daya beban adalah sebesar 2456 MW dan 1834 MVar.
7. Total rugi-rugi jaringan adalah sebesar 53.3 MW dan 196.7 MVar.

6. Referensi

- [1] L. Tobing, Bonggas, “Peralatan Tegangan Tinggi”, Erlangga, Jakarta, 2012
- [2] Saadat, H., 1999. “Power Sistem Analysis”, McGraw-Hill Companies, Inc: USA.
- [3] Beaty, H. Wayne, 2000. “Handbook of Electric Power Calculations”, Edisi ketiga. McGraw-Hill.
- [4] E. El-Hawary, Mohamed, 1983., ”Electrical Power Sistem Design and Analysis”, Reston Publishing Company, Inc. A Prentice-Hall Company, Virginia.
- [5] Stevenson, W.D.,”Analisis Sistem Tenaga Listrik,” Edisi Keempat. 1983. Penerbit Erlangga, Jakarta
- [6] Destiarini, Titin, 2009. “Studi & Analisa Aliran Daya Pada Sistem Sumatera Utara – Nangroe Aceh Darussalam Dengan Menggunakan Program Power Sistem Simulation Engineering (Pss/E) Versi 31.0.0”. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [7] Tanoto, Yusak, “ Visualisasi Sistem Tenaga Listrik Menggunakan PowerWorld Simulator”, Edisi Pertama, Graha Ilmu, Yogyakarta: 2013