

## Pengaturan Aliran Daya Reaktif Dengan Transformator Regulasi Jenis Pengatur Tegangan Pada Jaringan Sistem Tenaga Listrik

Dekpride Despa

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

e-mail: despa@unila.ac.id

**Abstrak**—Pengaturan aliran daya reaktif dalam sistem tenaga diperlukan untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi. Pengaturan aliran daya reaktif tersebut dilakukan dengan setting yang benar pada sadapan (tap setting) transformator regulasi. Penelitian ini dilakukan melalui studi literatur dan simulasi dengan software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). Simulasi dilakukan pada sistem 5 bus 6 saluran. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa transformator regulasi jenis pengatur tegangan dengan sadapan (tap setting) diletakkan pada bus yang ingin diatur tegangannya menunjukkan kenaikan tegangan sampai batas yang diijinkan ( $\pm 10\%$  terhadap tegangan nominal). Dengan demikian juga dapat mengurangi rugi-rugi pada sistem. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa pada saluran dimana transformator diletakkan dapat mencatu 77,07% daya reaktif yang dibutuhkan beban.

**Kata kunci:** Aliran daya, tranformator regulasi tegangan

**Abstract**—Reactive power flow regulation is power system is required to improve voltage profile and reduce system losses. Reactive power flow regulation is done using correct tap setting on the regulating transformer. The study is conducted through literature survey and simulation using ETAP. The result shows that correct tap setting on the regulated bus, voltage increases up to the allowable limits  $\pm 10\%$  over nominal voltage and at the same time reduce system losses. Finally, the result also shows that about 77,07% of total reactive power required by load can be met by the transformer.

**Keywords:** power flow, voltage regulating transformer

---

Naskah ini diterima pada tanggal 28 September 2008, direvisi pada tanggal 3 Nopember 2008 dan disetujui untuk diterbitkan pada tanggal 1 Desember 2008

### A. Pendahuluan

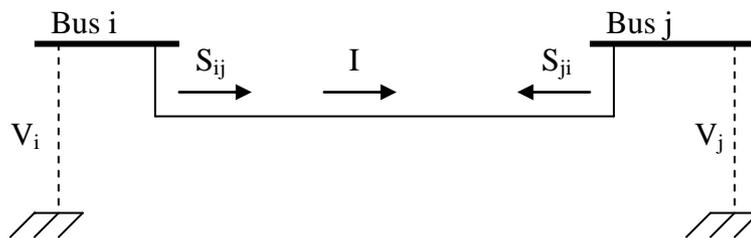
Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik sering berubah-ubah. Oleh karena itu pengendalian dalam pengoperasian sistem tenaga listrik untuk mendapatkan aliran daya yang baik sangat dibutuhkan. Penelitian ini menjelaskan salah satu cara untuk pengaturan aliran daya, khususnya daya reaktif yang menjadi faktor utama terjadinya jatuh tegangan pada sistem yang menyebabkan terjadinya susut daya. Salah satu cara pengaturan aliran daya reaktif tersebut adalah dengan menggunakan transformator regulasi jenis pengatur tegangan yang dipasang pada saluran yang mengalirkan daya reaktif lebih kecil dibanding saluran yang lain. Jika tidak ada koordinasi dalam melakukan pengaturan daya reaktif tersebut, maka hal ini sangat tidak efisien dan tidak ekonomis, karena sebenarnya pada keadaan ini rugi-rugi daya nyata masih relatif tinggi. Dengan melakukan pengaturan daya reaktif secara terpadu dan optimum, maka susut daya dari sistem akan dapat ditekan pada tingkat yang paling rendah, sehingga ini akan sangat menghemat biaya pembangkitan dan biaya operasional secara keseluruhan.

Adapun tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah:

- Mengidentifikasi perubahan aliran daya reaktif pada saluran dimana transformator regulasi jenis pengatur tegangan diletakkan.
- Menentukan letak transformator regulasi yang tepat pada saluran untuk memperbaiki profil tegangan pada bus yang mengalami jatuh tegangan.

Tabel 1 Penjelasan arah aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada sistem

Dalam Sistem	Dihitung dari $EI^*$
Pada generator	Jika P+, mensuplai daya Jika P-, menyerap daya Jika Q+, mensuplai daya reaktif (I tertinggal dari E) Jika Q-, menyerap daya reaktif (I mendahului E)
Pada beban (motor)	Jika P+, menyerap daya Jika P-, mensuplai daya Jika Q+, menyerap daya reaktif (I tertinggal dari E) Jika Q-, mensuplai daya reaktif (I mendahului dari E)



Gambar 1 Aliran Daya pada Saluran

c. Menentukan pengaruh perubahan *tap* terhadap kenaikan tegangan dan perubahan daya reaktif pada bus yang ingin diatur tegangannya.

**B. Tinjauan Pustaka**  
**Konsep Dasar Daya**

Tujuan dari sistem tenaga listrik adalah menyuplai daya listrik, baik daya aktif maupun daya reaktif ke beban melalui saluran transmisi dengan rugi-rugi sekecil mungkin. Daya aktif berhubungan dengan resistansi sedangkan daya reaktif berhubungan dengan reaktansi.

**Arah Aliran Daya**

Berikut ini adalah tabel penjelasan dari tanda daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) apakah daya tersebut disuplai atau diserap.

**Persamaan Daya**

Persamaan aliran daya aktif dan reaktif dari suatu bus pada sistem dalam keadaan mantap (*steady state*) dapat dijelaskan pada gambar 1.

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n$$

Injeksi daya dari bus-i adalah:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i^* \cdot I_i$$

dan  $S_i = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n$

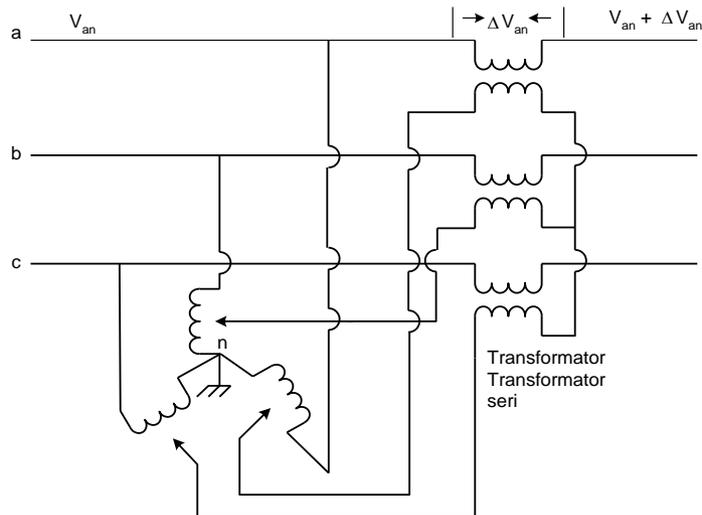
$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \angle \theta_{in} + \delta_n - \delta_i$$

Superscript (\*) = menyatakan konjugasi kompleks.

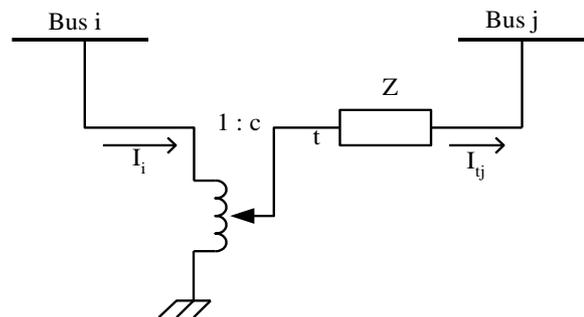
**Pengaturan Daya Reaktif**

Daya reaktif berperan besar dalam peristiwa jatuh tegangan pada saluran dan bus sistem tenaga. Untuk mengatasi jatuh tegangan pada bus sistem maka dapat dilakukan beberapa cara, antara lain: Meningkatkan tegangan pada pembangkit tetapi hal ini mengakibatkan arus lebih *lagging* sehingga daya reaktif dari generator menjadi besar dan dapat menurunkan daya aktif.

1. Penempatan kapasitor *shunt* pada bus, saluran transmisi/distribusi dan beban. Kapasitor sebagai pencatu var dapat



Gambar 2 Transformator regulasi untuk pengaturan tegangan



Gambar 3 Representasi transformator

dihubungkan secara tetap, tetapi sebagai pengatur tegangan dapat dihubungkan atau diputuskan sesuai dengan permintaan beban.

2. Penggunaan transformator regulasi jenis pengatur tegangan pada saluran transmisi atau distribusi.

### Pengaturan Dengan Transformator Regulasi Jenis Pengatur Tegangan

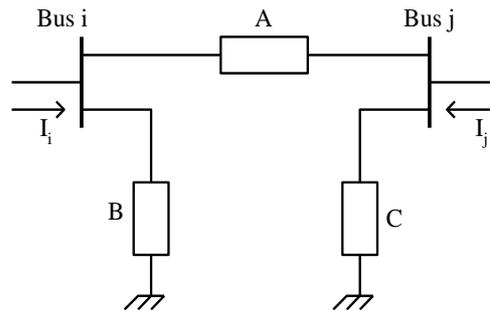
Hampir semua transformator menyediakan sadapan pada kumparan untuk menyetel perbandingan transformasi dengan mengubah sadapan itu pada saat transformator tidak bertenaga. Suatu perubahan sadapan dapat dilakukan juga pada saat transformator bertenaga, dan transformator semacam itu disebut *transformator pengubah sadapan beban*

(*load tap changing – LTC transformer*) atau *transformator pengubah sadapan dalam keadaan berbeban (tap changing under load – TCUL transformer)*.

Pengubahan sadapan ini terjadi secara otomatis dan dikerjakan oleh motor yang memberikan reaksi pada rel-rel yang disetel untuk menahan tegangan pada tingkat yang telah ditentukan. Rangkaian khusus memungkinkan perubahan ini tanpa memutuskan arusnya (Stevenson ; 1994).

### Pemodelan Transformator Regulasi Jenis Pengatur Tegangan pada Aliran Daya.

Rangkaian dalam bentuk rangkaian ekuivalen  $\pi$ . Dari gambar dapat diperoleh hubungan persamaan sebagai berikut:

Gambar 4 Rangkaian ekivalen  $\pi$ 

$$I_i = \frac{I_{ij}}{c}$$

dengan faktor transformasi yang berubah-ubah, dengan cara yang sama maka akan diperoleh:

$$I_i = (cV_j - V_i) \frac{y_{ij}}{c^2}$$

Bila persamaan arus tersebut dihubungkan dengan persamaan arus pada rangkaian ekivalen  $\pi$  seperti gambar 2.4 berikut ini, maka persamaan arus pada rangkaian  $\pi$  dapat dicari.

### Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)

Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) Power Station adalah software atau perangkat lunak untuk mensimulasikan power sistem dengan tampilan fully graphical dan dapat digunakan pada komputer dengan sistem operasi Microsoft Windows (Etap Powerstation User Guide ; 2000). Dengan ETAP Power Station, kita dapat bekerja secara langsung dengan tampilan grafis one line diagram dan underground cable raceway system. Analisis Aliran Daya Pada ETAP Power Station digunakan untuk menghitung tegangan pada bus, faktor daya, aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik. Analisis ini dapat digunakan pada keadaan swing, tegangan teregulasi dan under regulated power sources. Dapat digunakan pada konfigurasi sistem radial maupun loop. Untuk mendapatkan hasil perhitungan paling efisien kita dapat

memilih perhitungan yang digunakan yaitu Newton Raphson, Gauss Siedel atau Fast De Coupled.

### C. Metode Penelitian

Langkah langkah penelitian :

1. Membuat diagram satu garis dari sistem yang akan disimulasikan yaitu, sistem tenaga dengan 5 bus 6 saluran
2. Menentukan parameter data generator, data bus, trafo, data saluran dan data beban.
3. Simulasi dengan menggunakan *Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)*.
  - a. Simulasi sistem tanpa transformator.
  - b. Simulasi sistem dengan transformator.
4. Menganalisa hasil simulasi, yaitu menganalisa perubahan daya reaktif dan tegangan pada sistem dan membuat kesimpulan.

### Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Seperangkat PC dengan spesifikasi prosesor Intel Pentium III 667 MHz, SDRAM 128 MB dan harddisk 4 GB.
- *Operating System Windows 98 Second Edition* Versi 4.10.2222A.
- *Software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)* versi 4.0.0C tahun 1995 – 2000.

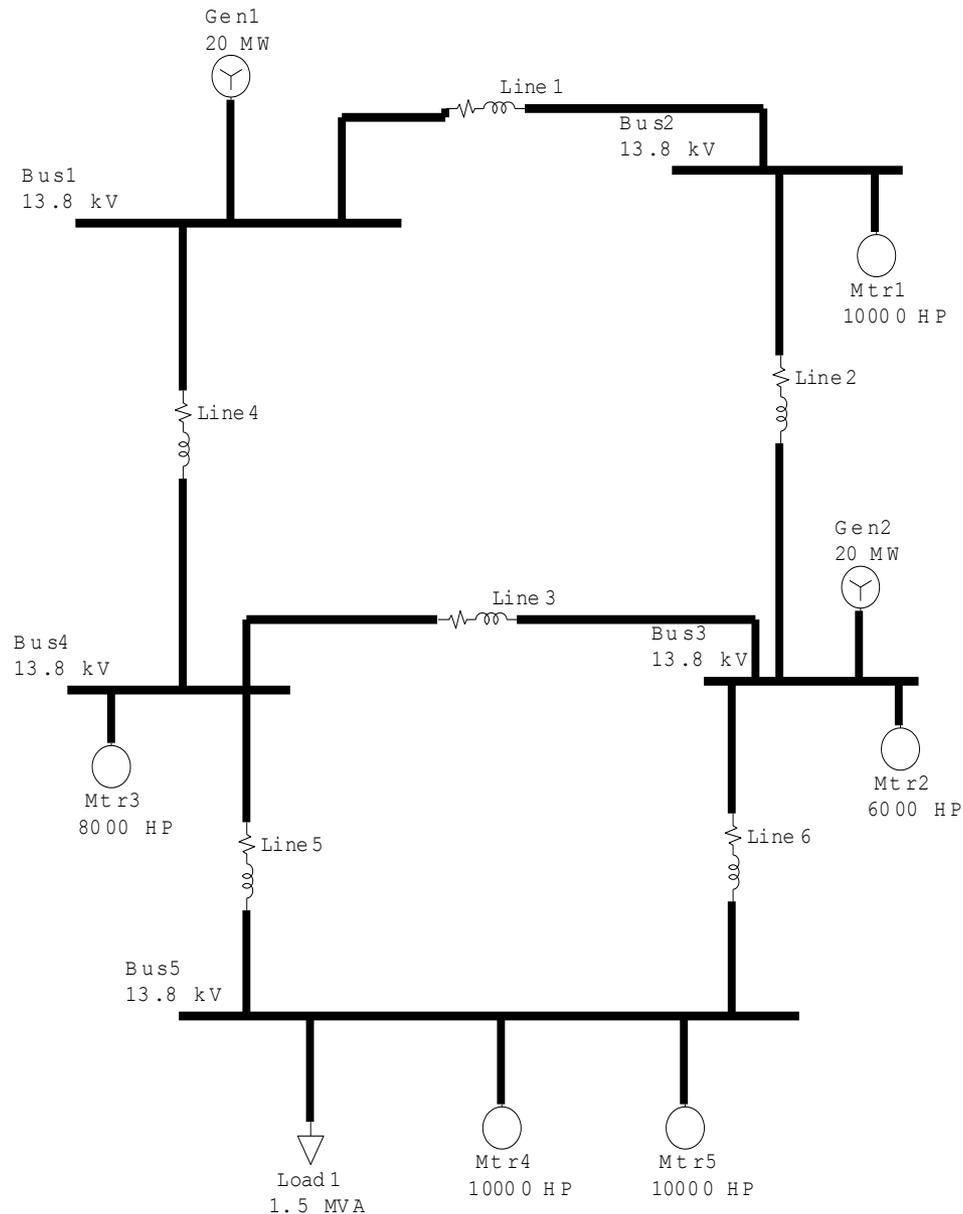
### Metode Perhitungan

Metode perhitungan pada simulasi ini digunakan metode perhitungan aliran daya dengan metode Newton Raphson. Untuk mengaplikasikan metode Newton-Raphson kedalam penyelesaian persamaan aliran

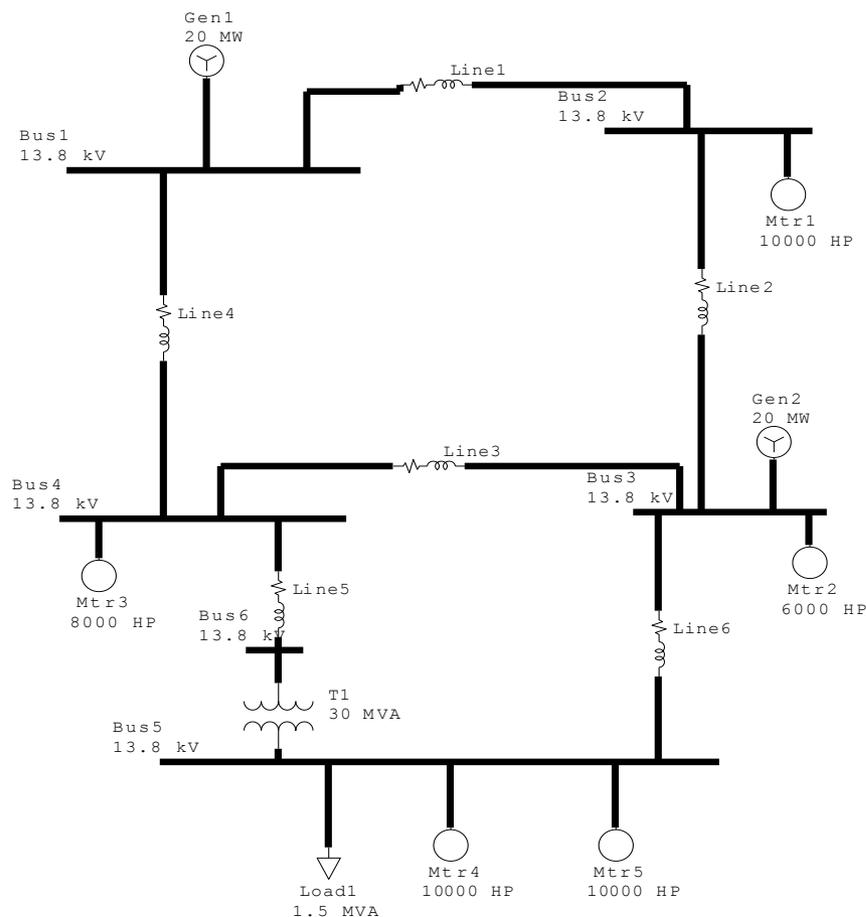
daya, maka tegangan bus dan admitansi saluran dinyatakan dalam bentuk polar. Ketika “n” sama dengan “i”, maka

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

### Sistem Tenaga dengan 5 Bus dan 6 Saluran



Gambar 5 Diagram satu garis sistem tenaga sebelum menggunakan transformator



Gambar 6 Diagram satu garis sistem tenaga setelah menggunakan transformator regulasi jenis pengatur tegangan.

Tabel 1 Data Pembangkitan

Bus	Pembangkitan		Keterangan
	P (MW)	Q (Mvar)	
1	...	...	Swing Bus
2	0	0	Bus Beban
3	20	...	Voltage Control
4	0	0	Bus Beban
5	0	0	Bus Beban

Tabel 2 Data Saluran

Saluran antar bus	Panjang saluran (km)	R (per unit)	X (per unit)
Saluran 1	5	0,0223	0,364
Saluran 2	9	0,0223	0,364
Saluran 3	5	0,0223	0,364
Saluran 4	7	0,0223	0,364
Saluran 5	20	0,0223	0,364
Saluran 6	5	0,0223	0,364

#### D. Hasil Dan Pembahasan

##### Hasil Simulasi Aliran Daya pada Sistem 5 Bus 6 Saluran Tanpa Transformator Pengatur Tegangan.

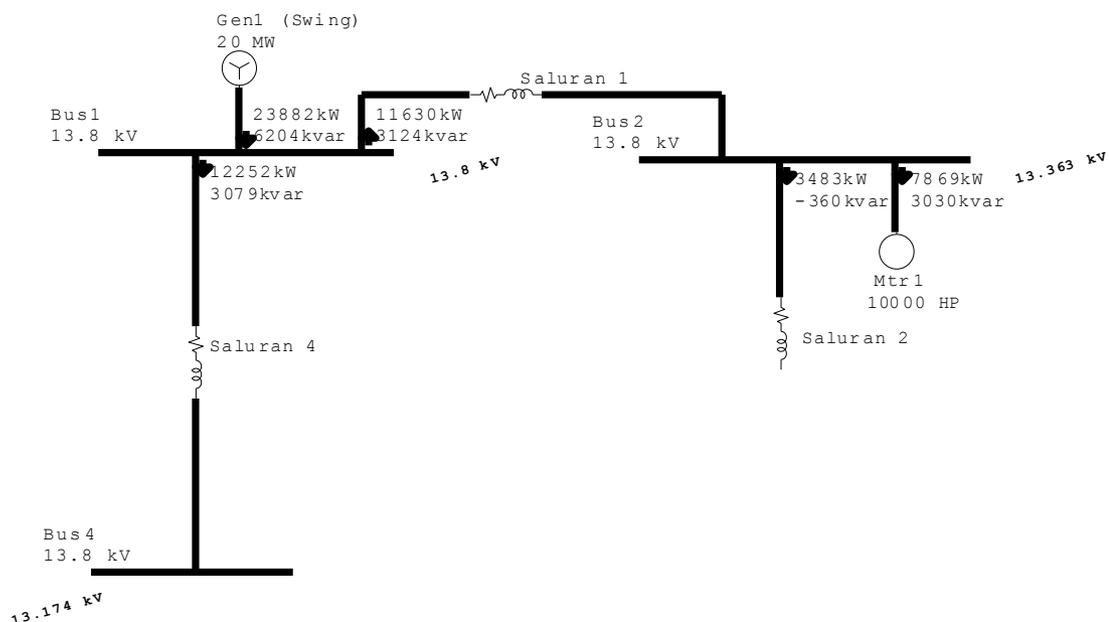
Tanda positif pada masing-masing daya aktif dan daya reaktif menunjukkan bahwa bus 1 mensuplai ke sistem baik daya aktif maupun daya reaktifnya. Besar aliran dayanya dapat dilihat pada gambar 7 maupun pada data dalam lampiran. Tegangan pada bus 1 ini sesuai dengan settingnya yaitu 13.8 kV. Untuk selanjutnya diperlihatkan aliran daya pada bus 2 seperti gambar 8 berikut ini.

Pada gambar terlihat bahwa pada bus 2 aliran daya reaktif yang menuju bus 3 melalui saluran 2 bernilai negatif, hal ini menunjukkan bahwa bus 2 menyerap daya reaktif dari bus 3 melalui saluran 2. Sedangkan daya aktif yang bernilai positif pada bus 2 yang mengalir pada bus 3 menunjukkan bahwa bus 2 mensuplai daya aktif pada bus 3 melalui saluran 2. Tegangan pada bus 2 turun dari yang semestinya menjadi 13,363 kV karena adanya daya reaktif yang masuk ke bus 2

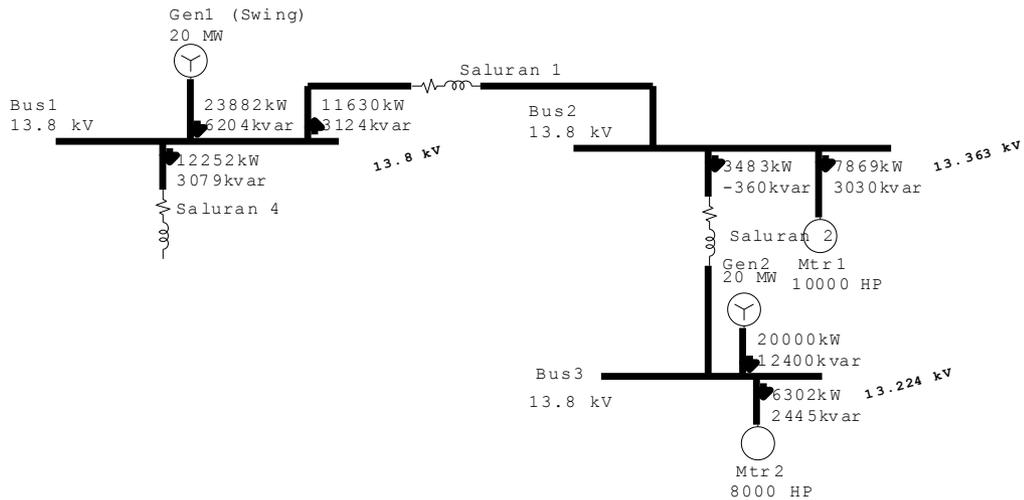
dari bus 1 dan bus 3. Selanjutnya ditunjukkan hasil simulasi aliran daya pada bus 3 seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.

Pada gambar 9 terlihat aliran daya menuju ke bus 4 melalui saluran 3 dan aliran daya menuju ke bus 4 melalui saluran 3 dan aliran daya menuju ke bus 5 melalui saluran 6. Dalam aliran daya yang meninggalkan bus 3 ini, semuanya menunjukkan nilai yang positif yang berarti bus 3 mensuplai daya aktif maupun daya reaktif ke bus 4 dan bus 5. Dalam keadaan ini tegangan bus 3 masih dalam batas yang aman yaitu 13,224 kV.

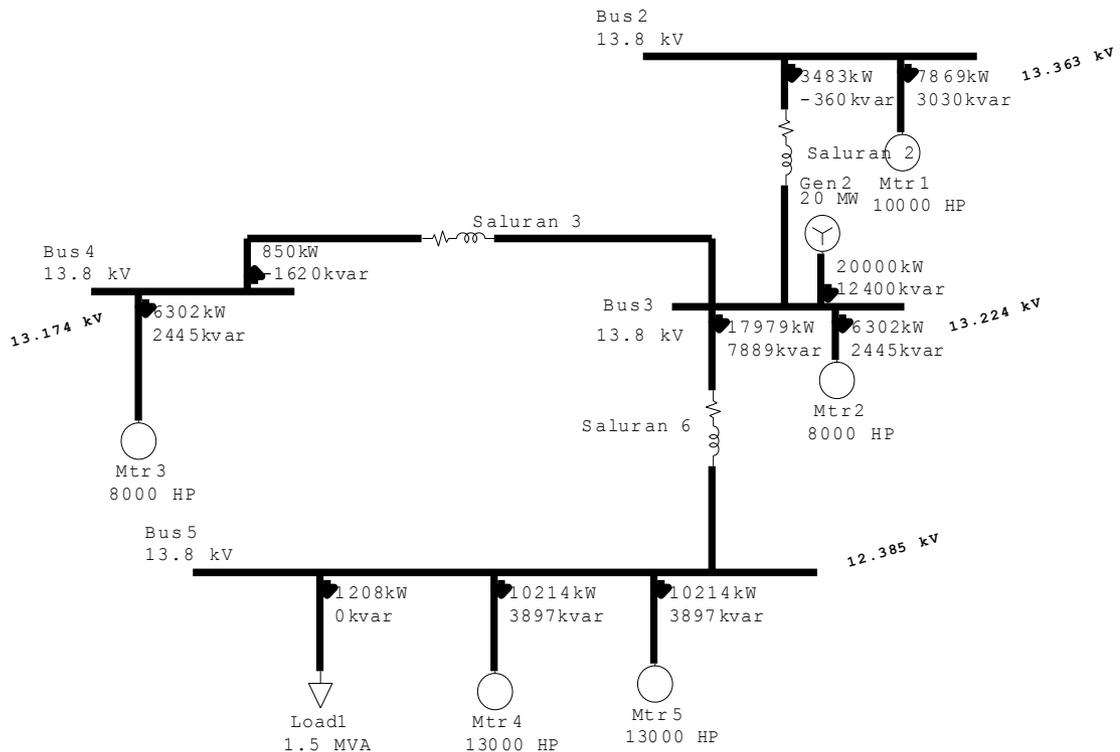
Gambar 10 adalah gambar yang menunjukkan keadaan aliran daya pada bus 4. Daya aktif maupun daya reaktif yang melalui saluran 5 yang menuju bus 5 bernilai positif semua, hal ini menunjukkan bahwa bus 4 mensuplai daya aktif dan reaktif ke bus 5. Tegangan pada bus 4 sebesar 13,174 kV masih dalam batas yang diijinkan sehingga dayanya bisa terkirim dengan baik. Turunnya tegangan sampai pada nilai ini karena masuknya daya reaktif dari bus 1 dan bus 3.



Gambar 7 Hasil simulasi aliran daya pada bus 1



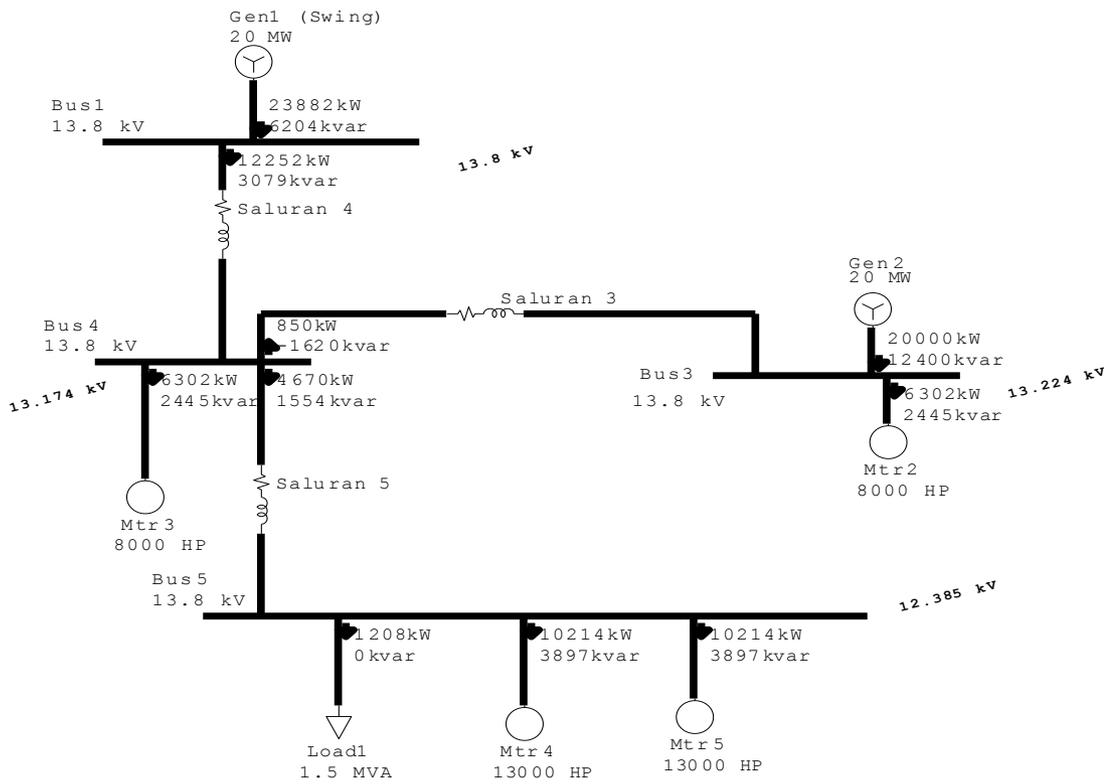
Gambar 8 Hasil simulasi aliran daya pada bus 2



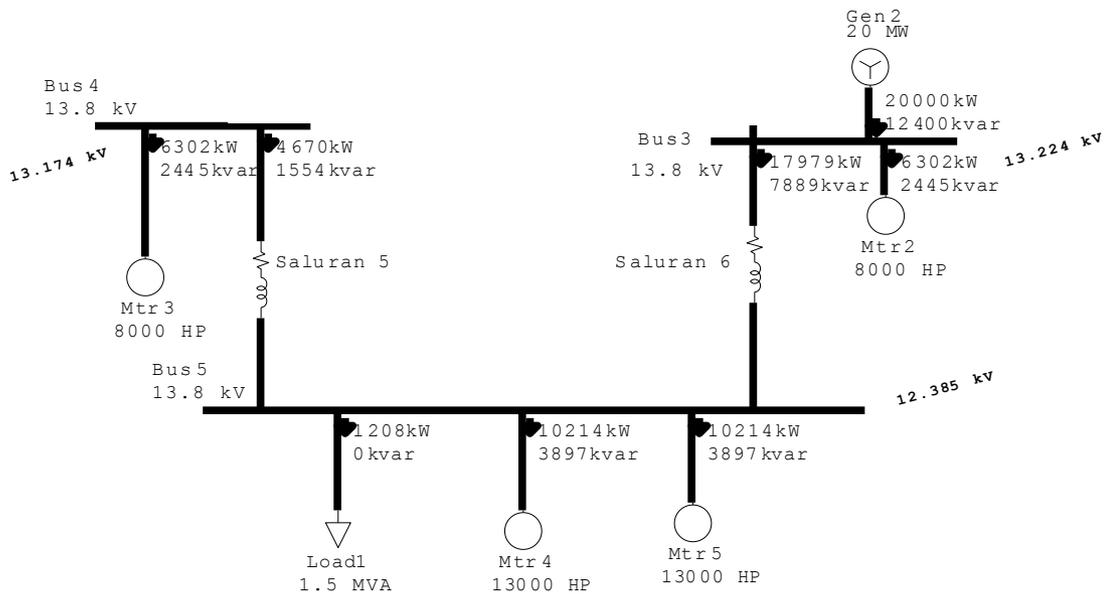
Gambar 9 Hasil simulasi aliran daya pada bus 3

Tegangan pada bus berada pada nilai 12,385 kV yang berarti di bawah batas aman ( $\pm 10\%$ ) dari tegangan nominal bus sebesar 13,8 kV. Ini terjadi karena adanya daya reaktif yang masuk ke bus 5, baik dari bus 4 maupun dari bus 3. Tampak dari

gambar bahwa aliran daya reaktif yang sangat besar berasal dari bus 3 saluran 6 sebesar 7,889 Mvar sedangkan dari bus 4 hanya mengirimkan daya reaktif sebesar 1,554 Mvar.



Gambar 10 Hasil simulasi aliran daya pada bus 4

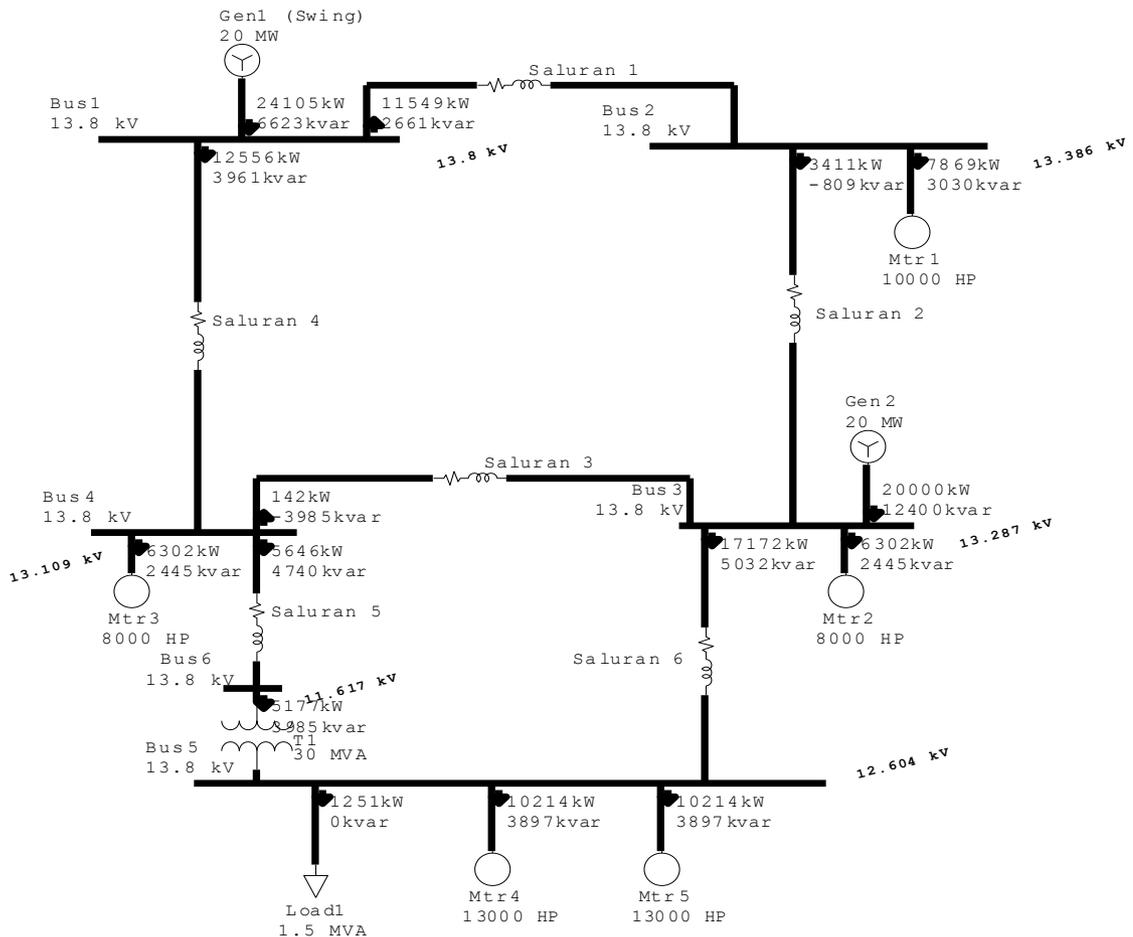


Gambar 11 Hasil simulasi aliran daya pada bus 5

**Hasil Simulasi Aliran Daya pada Sistem 5 Bus 6 Saluran dengan Transformator Pengatur Tegangan**

Perubahan aliran daya reaktif dari bus 4 ke bus 5 melalui saluran 5 meningkat menjadi

4,740 Mvar dan dari bus 3 ke bus 5 melalui saluran 6 berkurang menjadi 5,032 Mvar, serta tegangan pada bus 5 meningkat menjadi 12,604 kV.



Gambar 12 Hasil simulasi setelah menggunakan transformator regulasi jenis pengatur tegangan dengan perubahan tap dari -10 % s/d 10 %

Tabel 3 Perubahan besar aliran daya sebelum dan sesudah digunakan transformator dengan perubahan tap dari -10 % sampai dengan 10 %

Aliran Daya	Sebelum digunakan Transformator		Sesudah digunakan Transformator		Perubahan Aliran Daya	
	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
Bus 1 ke Bus 2	11.630	3.124	11.549	2.661	0.081	0.463
Bus 1 ke Bus 4	12.252	3.079	12.556	3.961	0.304	0.882
Bus 2 ke Bus 3	3.483	-0.360	3.411	-0.809	0.072	0.449
Bus 4 ke Bus 3	0.850	-1.620	0.142	-3.985	0.708	2.365
Bus 3 ke Bus 5	17.979	7.889	17.172	5.032	0.807	2.857
Bus 4 ke Bus 5	4.670	1.554	5.646	4.740	0.976	3.186

Tabel 4 Perubahan tegangan sebelum dan sesudah digunakan transformator dengan perubahan tap -10 % sampai dengan 10 %

Bus	Tegangan Sebelum digunakan Transformator		Tegangan Sesudah digunakan Transformator		Perubahan Tegangan (kV)
	kV	%	kV	%	
1	13,800	100,00	13,800	100,00	0
2	13,363	96,83	13,386	97,00	0,023
3	13,224	95,83	13,287	96,28	0,063
4	13,174	95,46	13,109	94,99	0,065
5	12,385	89,75	12,604	91,33	0,219

### Analisis Hasil Simulasi Aliran Daya pada Sistem 5 Bus 6 Saluran

Dari hasil simulasi sebelum menggunakan transformator diperoleh tegangan bus 5 adalah sebesar 12,385 kV (89,75 %). Tegangan ini berada diluar batasnya, yaitu minimal 12,42 kV (90%) dan maksimal 15,18 kV (110 %) dari tegangan nominal 13,8 kV. Kontribusi jatuh tegangan ini disebabkan oleh adanya aliran daya reaktif yang cukup besar dari bus 3 melalui saluran 6. Oleh karena itu untuk mengurangi jatuh tegangan pada bus 5 dengan cara mengalihkan sebagian aliran daya reaktif dari saluran 6 ke saluran 5 dengan bantuan alat pengatur aliran daya reaktif yaitu transformator pengatur tegangan. Transformator regulasi jenis pengatur tegangan bisa digunakan untuk mengatur aliran daya reaktif pada saluran. Oleh karena itu pada salah satu ujung saluran ditempatkan sebuah transformator regulasi tegangan yang mengatur aliran daya reaktif yang melalui saluran. Saluran yang dipilih untuk dipasang transformator regulasi pengatur tegangan adalah saluran yang mengalirkan daya reaktif lebih kecil, dalam simulasi ini dipilih saluran 5 yang hanya mengalirkan 1,554 Mvar saja. Dengan demikian diharapkan bahwa kontribusi jatuh tegangan pada bus 5 dapat berkurang.

Pertama-tama kita memerintahkan komputer untuk melihat transformator sebagai LTC (*Load Tap Changing*) dengan

*tap* untuk mempertahankan bus 5 pada 13,8 kV. Bila tegangan pada bus 5 dinaikkan oleh transformator pada saluran 5, jatuh tegangan pada saluran 6 dapat dikurangi dan hal ini dapat dilakukan dengan mengurangi aliran daya reaktif tanpa banyak mengubah aliran daya aktifnya. Dengan membandingkan hasil simulasi pada sistem sebelum menggunakan transformator pengatur tegangan dengan hasil simulasi setelah menggunakan transformator pengatur tegangan tampak bahwa daya reaktif Q yang mengalir ke dalam bus 5 dari bus 3 melalui saluran 6 mengalami penurunan, yaitu dari 7,889 Mvar menjadi 5,032 Mvar atau terdapat perubahan aliran daya reaktif sebesar 2,857 Mvar. Dan daya reaktif yang melalui saluran 5 dari bus 4 ke bus 5 mengalami peningkatan dari 1,554 Mvar menjadi 4,740 Mvar atau mengalami perubahan aliran daya reaktif sebesar 3,186 Mvar. Sedangkan untuk daya aktifnya tidak banyak mengalami perubahan. Hal ini terjadi karena pemasangan transformator regulasi jenis pengatur tegangan yang dapat mengalihkan sebagian aliran daya reaktif dari saluran 6 ke saluran 5. Penambahan daya reaktif pada saluran 5 menjadi 4,740 Mvar menyebabkan tegangan pada sisi masukan transformator menjadi sangat rendah jauh dibawah tegangan yang diinginkan yaitu sebesar 11,617 kV, akan tetapi transformator

menaikkan tegangan pada sisi tegangan keluarannya menjadi 12,604 kV (91,33 %).

## E. Kesimpulan Dan Saran

### Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan:

1. Terjadi perubahan aliran daya reaktif pada saluran setelah digunakan transformator regulasi jenis pengatur tegangan, yaitu pada sistem 5 bus 6 saluran aliran daya reaktif pada saluran 5 berubah dari 1,554 Mvar menjadi 4,740 Mvar
2. Untuk memperoleh tegangan yang optimum pada bus yang ingin diatur, letak serta *tap* transformator regulasi jenis pengatur tegangan yang tepat adalah pada sisi bus yang ingin diatur tegangannya, yaitu pada sistem 5 bus 6 saluran diletakkan pada saluran 5 antara bus 4 dan 5 yang mensuplai daya reaktif lebih kecil (1,554 Mvar) dibandingkan saluran 6 antara bus 3 dan bus 5 yang mensuplai daya reaktif lebih besar (7,889 Mvar)

### Saran

Agar sistem yang dianalisis atau disimulasikan mengarah pada jaringan sistem tenaga yang ada atau lebih besar, misalnya jaringan sistem tenaga di Lampung atau Jawa – Bali.

## F. Daftar Pustaka

- [1] A. Gross, Charles., 1986, "*Power System Analysis*", John Wiley & Sons, United States of America.
- [2] Bruce, Smith., Jos Arrilaga., 1998, "*AC-DC Power System Analysis*", Short Run Press, Ltd., England.
- [3] Deni, Almanda, Ir., 2000, "Peranan Kapasitor dalam Penggunaan Energi Listrik". Elektroindonesia.com.
- [4] Elgerd, Olle L., 1999, "*Electric Energy Systems Theory*", McGraw-Hill Publishing Company Limited., New Delhi.
- [5] -----, 2000, "*TAP Powerstation User Guide Operation Technology*".
- [6] Gatut Budiono., 1995, "Penerapan Metode Dekomposisi dalam Minimisasi Susut Daya dengan Pengaturan Optimal Daya Reaktif dan Tap Transformator pada Jaringan Tenaga Listrik", Elektroteknik ITB., Bandung.
- [7] Grainger, John J., William D. Stevenson, 1994, "*Power System Analysis*". McGraw Hill, Inc. Singapore.
- [8] Harrison, J.A., "*The Essence of Electric Power System*". Prentice Hall. Great Britain.
- [9] Hosea, E. dan Yusak Tanoto, 2004, "Perbandingan Analisa Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Algoritma Genetika dan Metode NewtonRaphson".<http://puslit.petra.ac.id/journals/electrical>.
- [10] Kundur, Prabha, 1994, "*Power System Stability and Control*". Electric Power Research Institute.
- [11] Lister, 1993, "Mesin dan Rangkaian Listrik (Terjemahan)", Erlangga, Jakarta.
- [12] Nagrath, Kothari., 1985, "*Electric Machines*", Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [13] Paresh Chandra, Sen., 1996, "*Principles of Electric Machines and Power Electronics*", 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons, Inc. United States of America.
- [14] Richardson, Dovald V., Arthur J. Caisse, 1996, "*Rotating Electric Machinery and Transformer Technology 4<sup>th</sup> Edition*", Prentice-Hall, Inc. United States of America.