



Analisa
SISTEM TENAGA

Rimbawati, S.T., M.T.

Muhammad Zayadi, S.Pd

Partaonan Harahap, S.T.,M.T.

Noorly Evalina, S.T., M.T.

Editor

Ir. Dultudes Mangopo, S.T.,M.T.

Analisa Sistem Tenaga

HAK CIPTA DILINDUNGI UNDANG-UNDANG

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam dan dengan sistem penyimpanan lainnya tanpa izin tertulis dari penulis.

Analisa Sistem Tenaga

Rimbawati, S.T., M.T.
Muhammad Zayadi, S.Pd
Partaonan Harahap, S.T.,M.T.
Noorly Evalina, S.T., M.T.

Editor
Ir. Dultudes Mangopo, S.T.,M.T.



Judul
Analisa Sistem Tenaga

Penulis
Rimbawati, S.T., M.T.
Muhammad Zayadi, S.Pd
Partaonan Harahap, S.T.,M.T.
Noorly Evalina, S.T., M.T.

Editor
Ir. Dultudes Mangopo, S.T.,M.T.

Layouter
Fimanda Arlita, M.Pd.

Cetakan Pertama; November 2024
(xii + 248 hlm); 15.5 x 23 cm

ISBN : 978-623-408-804-5 (cetak)
978-623-408-805-2 (ebook)

Penerbit



Redaksi

Jalan Kapten Mukhtar Basri No 3 Medan, 20238

Telepon, 061-6626296, Fax. 061-6638296

Email; umsupress@umsu.ac.id

Website; <http://umsupress.umsu.ac.id/>

Anggota IKAPI Sumut, No: 38/ Anggota Luar Biasa/SUT/2020

Anggota APPTI, Nomor: 005.053.1.09.2018

Anggota APPTIMA (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah Aisyiyah)

Daftar Isi

Daftar Isi _____	v
Prakata _____	ix
Kata Pengantar Editor _____	xi
BAB I PENGANTAR PEMROGRAMAN MATLAB _____	1
A. Lingkungan Kerja dalam MATLAB _____	1
B. Memulai MATLAB _____	4
C. Pemrograman Fungsi Matematika pada <i>Command Window</i> MATLAB _____	5
Latihan _____	16
BAB II PEMROGRAMAN KALKULUS DASAR PADA COMMAND WINDOW MATLAB _____	19
A. Pemrograman Limit Fungsi _____	19
B. Menentukan Asimtot Kurva _____	21
C. Menentukan Nilai Maksimum dan Minimum Kurva _____	22
D. Pemrograman Turunan Fungsi dan Garis Singgung Kurva _____	23
E. Pemrograman Integral Fungsi dan Luas Daerah di Bawah Kurva _____	26
Latihan _____	29
BAB III PEMROGRAMAN MATRIKS PADA COMMAND WINDOW MATLAB _____	31
A. Operasi Tunggal (<i>Uner</i>) _____	31
B. Operasi Biner pada Matriks _____	35
Latihan _____	40
BAB IV PEMROGRAMAN STRUKTUR IF-ELSEIF-ELSE-END PADA M-FILE MATLAB _____	43
Latihan _____	48

BAB V PEMROGRAMAN DENGAN STRUKTUR	
FOR-END PADA M-FILE MATLAB _____	49
A. Pemrograman Faktorial _____	50
B. Pemrograman Simulasi Limit Fungsi _____	54
Latihan _____	56
BAB VI PEMROGRAMAN DENGAN STRUKTUR	
WHILE-END PADA M-FILE MATLAB _____	59
A. Pemrograman Komputasi untuk Mensimulasikan Definisi Pembagian _____	59
B. Pemrograman Komputasi untuk Mensimulasikan Definisi Algoritma Euclidean _____	63
Latihan _____	65
BAB VII GAMBARAN UMUM SISTEM TENAGA	
LISTRİK _____	67
A. Sistem Tenaga Listrik _____	67
B. Analisa Sistem Tenaga Listrik _____	67
C. Model Sistem Tenaga Listrik _____	68
D. Sistem Per-Unit _____	69
E. Matriks Jaringan _____	70
F. Analisa Aliran Daya _____	71
G. Analisa Gangguan _____	72
Latihan _____	72
BAB VIII ANALISA SISTEM TENAGA _____	73
A. Mesin Serempak _____	74
B. Saluran Transmisi _____	75
C. Transformator _____	76
D. Beban _____	76
Latihan _____	78
BAB IX REPRESENTASI SISTEM TENAGA LISTRİK _____	79
A. Diagram Satu Garis Saluran _____	79
B. Daya Listrik _____	81

C. Sistem Tiga Fasa _____	89
D. Daya pada Sistem Tiga Fasa _____	91
Latihan _____	96
BAB X SISTEM PER UNIT _____	97
Latihan _____	110
BAB XI MENGUBAH KUANTITAS DASAR PER UNIT	111
A. Mengubah Kuantitas Dasar Per Unit _____	111
B. Diagram Segaris _____	114
C. Diagram Impedansi dan Diagram Reaktansi _____	116
Latihan _____	120
BAB XII KESETARAAN SUMBER _____	123
Latihan _____	126
BAB XIII PERSAMAAN-PERSAMAAN SEMPUL _____	127
Latihan _____	135
BAB XIV STUDI ALIRAN DAYA _____	139
A. Kapasitor dan Reaktor <i>Shunt</i> _____	142
B. Beban (<i>Load</i>) _____	142
Latihan _____	143
BAB XV METODE GAUSS-SEIDEL, NEWTON-RAPHSON, FAST DECOUPLED _____	145
A. Metode Gauss-Seidel _____	145
B. Metode Newton-Raphson _____	158
C. Metode <i>Fast-Decoupled</i> _____	180
Latihan _____	201
BAB XVI GANGGUAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK _____	203
A. Gejala Transien pada Rangkaian <i>RL</i> Seri _____	203

B. Tegangan dalam Mesin Berbeban daam Kondisi <i>Fault</i> _____	204
C. Perbandingan Sudut Pemutus Kritis dengan Metode Rungge-Kutta Orde 4 _____	209
Latihan _____	217
BAB XVII IMPEDANSI BUS (Z_{bus}) _____	219
Latihan _____	227
BAB XVIII GANGGUAN EKSTERNAL PADA SISTEM TENAGA LISTRIK _____	229
A. Jenis Gangguan _____	232
B. Penyebab Gangguan _____	234
Latihan _____	235
Glosarium _____	237
Daftar Pustaka _____	239
Tentang Penulis _____	241
Tentang Editor _____	243
Indeks _____	245

Prakata

Dengan mengucapkan Syukur kepada Allah SWT atas KaruniaNya. Sehingga dapat terselesainya penyusunan buku Analisis Sistem Tenaga yang merupakan salah satu buku acuan matakuliah wajib bagi mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro. Penyusunan buku ajar merupakan salah satu kegiatan dalam rangka mengembangkan proses pendidikan dan pengajaran, untuk memudahkan mahasiswa dalam mempelajari dengan memahami, serta mengembangkan materi perkuliahan sesuai dengan kurikulum dan silabus yang ada. Bagian buku Analisis Sistem Tenaga disusun dalam urutan bab-bab.

Dalam buku hanya dibahas masalah yang berhubungan dengan sistem penyaluran tenaga listrik yang melalui saluran transmisi udara, Pada Sistem Tenaga Listrik selalu memiliki kecenderungan yaitu terjadinya pembentukan sistem Interkoneksi antara satu pusat pembangkit dengan Pembangkit lainnya dengan tujuan agar sistem memiliki tingkat keandalan yang mumpuni serta distribusi listrik yang layak. Mengingat hampir seluruh saluran transmisi menggunakan saluran transmisi udara.

Menyadari bahwa dalam penyusunan buku buku Analisis Sistem Tenaga masih banyak kekurangannya, maka diharapkan adanya saran dan kritik guna perbaikan untuk mencapai kesempurnaan. Akhirnya disampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sampai dapat diterbitkannya buku Analisis Sistem Tenaga, bagian Saluran Transmisi Daya Elektrik dan semoga buku ini dapat bermanfaat.

Medan, September 2024

Rimbawati, S.T., M.T.
Muhammad Zayadi, S.Pd
Partaonan Harahap, S.T.,M.T.
Noorly Evalina, S.T., M.T.

Kata Pengantar Editor

Alhamdulillah, Buku ini berisi bahasan analisis sistem tenaga, yang merupakan suatu analisis pada tingkat transmisi (tidak termasuk sistem distribusi); di sini diberikan penjelasan mengenai perhitungan dalam per-unit serta komponen simetris yang akan dimanfaatkan pada pembahasan di bab-bab selanjutnya. Pada bab ini berisi bahasan mengenai piranti utama sistem tenaga, mencakup saluran transmisi, transformator, dan mesin sinkron; di bab ini dibahas rangkaian ekuivalen serta kondisi pembebanan yang mungkin terjadi. Bab terakhir berisi bahasan mengenai permasalahan aliran daya, dengan salah satu metoda solusi yaitu metoda Newton-Raphson. Pada dasarnya kondisi operasional sistem yang dibahas adalah kondisi mantap; hanya sedikit disinggung situasi transien pada saluran transmisi dan mesin sinkron. Stabilitas transien dan analisis keadaan hubung singkat belum dibahas dalam buku ini. Mudah-mudahan sajian ini bermanfaat bagi para pembaca. Saran dan usulan para pembaca untuk perbaikan dalam publikasi selanjutnya, sangat penulis harapkan.

Hormat Saya

Ir. Dultudes Mangopo, S.T.,M.T

PENGANTAR PEMROGRAMAN MATLAB

A. Lingkungan Kerja dalam MATLAB

MATLAB merupakan bahasa pemrograman yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti Delphi, Basic maupun C++. MATLAB merupakan bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi dan pemrograman seperti komputasi matematika, analisis data, pengembangan algoritma, simulasi dan pemodelan dan grafik-grafik perhitungan. MATLAB hadir dengan membawa warna yang berbeda. Hal ini karena MATLAB membawa ke istimewaan dalam fungsi-fungsi matematika, fisika, statistik dan visualisasi. MATLAB dikembangkan oleh *MathWorks*, yang pada awalnya dibuat untuk memberikan kemudahan mengakses data matriks pada proyek LINPACK dan EISPACK. Saat ini MATLAB memiliki ratusan fungsi yang dapat digunakan sebagai *problem solver* mulai dari *simple* sampai masalah-masalah yang kompleks dari berbagai disiplin ilmu.

Beberapa lingkungan lingkungan kerja MATLAB yang merupakan bagian dari Window MATLAB, diantaranya:

1. *Current Directory*

Window ini menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan MATLAB. Kita dapat mengganti direktori ini sesuai dengan tempat direktori kerja yang diinginkan. *Default* dari alamat direktori berada dalam *folder works* tempat program files MATLAB berada.

2. *Command History*

Window ini berfungsi untuk menyimpan perintah-perintah apa saja yang sebelumnya dilakukan oleh pengguna MATLAB.

3. *Command Window*

Window ini adalah *window* utama dari MATLAB. Disini adalah tempat untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variabel, menjalankan proses-proses serta melihat isi variabel.

4. *Workspace*

Workspace berfungsi untuk menampilkan seluruh variabel-variabel yang sedang aktif pada saat pemakaian MATLAB. Apabila variabel berupa data matriks berukuran besar maka *user* dapat melihat isi dari seluruh data dengan melakukan *double* klik pada variabel tersebut. MATLAB secara otomatis akan menampilkan *window array editor* yang berisikan data pada setiap variabel yang dipilih *user*.

5. *Getting Help*

MATLAB menyediakan fungsi *help* yang berisikan beberapa tutorial mengenai MATLAB dan segala keunggulannya. *User* dapat menjalankan fungsi ini dengan menekan tombol pada *toolbar helpwin* pada *Command Window*. MATLAB juga menyediakan fungsi demos yang berisikan tutorial MATLAB serta contoh-contoh program yang biasa dibuat di MATLAB.

6. *Interrupting dan Terminating* dalam MATLAB

Untuk menghentikan proses yang sedang berjalan pada MATLAB dapat dilakukan dengan menekan tombol Ctrl+C. Sedangkan untuk keluar dari MATLAB dapat

dilakukan dengan menuliskan perintah *exit* atau *quit* pada *Command Window* atau dengan menekan menu *Exit* pada bagian menu *File* dari *Menu Bar*.

Sebagai sebuah sistem, MATLAB tersusun dari 5 bagian utama:

a. *Development Environment*

Merupakan sekumpulan perangkat dan fasilitas yang membantu pengguna untuk menggunakan fungsi-fungsi dari *file-file* MATLAB. Beberapa perangkat ini merupakan sebuah *Graphical User Interface* (GUI). Termasuk di dalamnya adalah MATLAB desktop dan *Command Window*, *Command History*, sebuah *Editor* dan *Debugger*, *Browsers* untuk melihat *Help*, *Workspace*, *Files*, dan *Search Path*.

b. *MATLAB Mathematical Function Library*

Merupakan sekumpulan algoritma komputasi mulai dari fungsi-fungsi dasar.

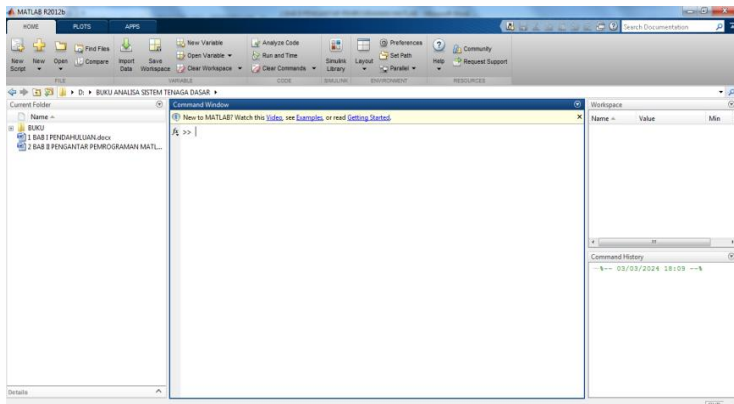
c. *MATLAB language*

Merupakan suatu *high-level matrix/array language* dengan *control flow statements*, *functions*, *data structures*, *input/output*, dan fitur-fitur *object-oriented programming*. Ini memungkinkan bagi kita untuk melakukan “pemrograman dalam lingkup sederhana” untuk mendapatkan hasil yang cepat, dan “pemrograman dalam lingkup yang lebih besar” untuk memperoleh hasil-hasil dan aplikasi yang kompleks.

d. *Graphics*

MATLAB memiliki fasilitas untuk menampilkan vektor dan matriks sebagai suatu grafik. Di dalamnya melibatkan fungsi-fungsi level tinggi untuk

visualisasi data dua dimensi dan data tiga dimensi, *image processing*, *animation*, dan *presentations graphics*. Ini juga melibatkan fungsi level rendah yang memungkinkan bagi anda untuk membiasakan diri untuk memunculkan grafik mulai dari bentuk yang sederhana sampai tingkatan GUI pada aplikasi MATLAB anda.



Gambar 1.1 Lingkungan Kerja dalam MATLAB

B. Memulai MATLAB

Perhatikan dekstop pada layar monitor PC, anda memulai MATLAB dengan melakukan double klik pada *short cut* icon MATLAB.



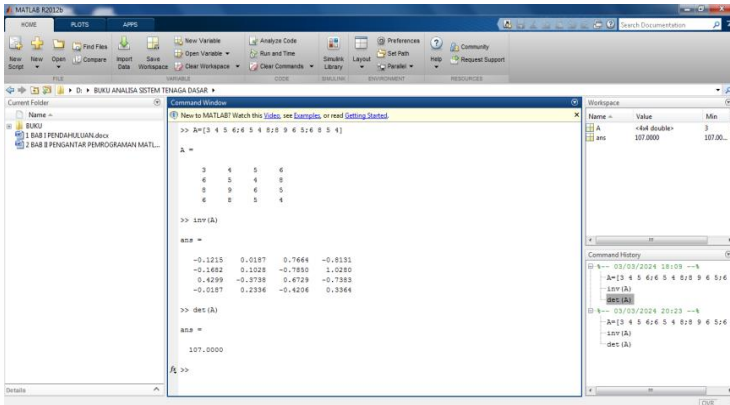
Gambar 1.2 Icon MATLAB pada desktop PC

Selanjutnya anda akan mendapatkan tampilan seperti gambar 1.1. Sedangkan untuk mengakhiri sebuah sesi MATLAB, anda bisa melakukan dengan dua cara, pertama pilih *File* → *Exit MATLAB* dalam *window* utama MATLAB

yang sedang aktif, atau cara kedua lebih mudah yaitu cukup ketikkan *type quit* dalam *Command Window*. Mengeksekusi ikon MATLAB di layar komputer ataupun melalui tombol *Start Windows*.

C. Pemrograman Fungsi Matematika pada *Command Window* MATLAB

Command Window merupakan tempat memberikan *script* perintah dan tempat melihat *output* program. Seperti contoh berikut:



Gambar 1.3 Tampilan *Command Window* MATLAB Pada *Command Window*, perintah `>> A=[3 4 5 6;6 5 4 8;8 9 6 5;6 8 5 4]` adalah pendefinisian matriks berordo 4×4 dan diperoleh *output* sebagai berikut

```
A =
     3     4     5     6
     6     5     4     8
     8     9     6     5
     6     8     5     4
```

yang berarti bahwa, pada komputer telah terdefinisi suatu matriks *A* dengan elemen-elemen sebagaimana di atas. Selanjutnya terlihat perintah mencari invers matriks *A* dengan perintah `inv(A)` dengan *output* sebagai berikut

```
>> inv(A)
ans =
    -0.1215    0.0187    0.7664   -0.8131
   -0.1682    0.1028   -0.7850    1.0280
    0.4299   -0.3738    0.6729   -0.7383
   -0.0187    0.2336   -0.4206    0.3364
```

Kemudian terlihat ada perintah $\det(A)$ yang berarti meminta komputer memberikan *output* determinan matriks A dan diperoleh hasil

```
>> det(A)
ans =
    107.0000
```

Berikut adalah beberapa bahasa dasar dalam pemrograman fungsi matematika yang dapat dibangun di *Command Window*. Sebagai latihan, pembaca diminta mencobanya pada *Command Window* dengan cara menuliskan *script* komputasinya pada *Command Window*. *Output* yang diperoleh dipastikan sama pada *output* sebagaimana yang diberikan.

1. Pendefinisian Fungsi dengan Perintah `syms x`

Pendefinisian fungsi aljabar yang memuat variabel x diawali dengan memberikan `syms x` merupakan singkatan dari $s_y = \text{simbol}$, $m = \text{mathematics}$ dan s merupakan bentuk jamak sedangkan x adalah variabel simbolnya.

a. Pendefinisian x sebagai simbol matematika

```
syms x
```

b. Pendefinisian fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

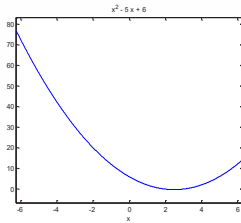
```
>> f=x^2-5*x+6
```

```
f =
```

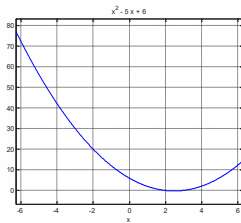
```
x^2 - 5*x + 6
```

c. Menggambar contoh grafik fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

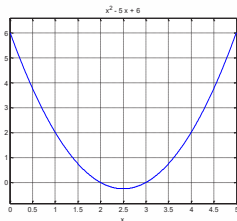
```
>> ezplot(f)
```



- d. Menggambar garis-garis koordinat grafik fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$
 >> grid on



- e. Menggambar grafik fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$ pada domain $0 \leq x \leq 5$ dengan $\Delta x = 0,25$
 >> ezplot(f, [0:0.25:5])



Menghitung nilai dari $f(-3)$ dari fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

```
>> subs(f, -3)
ans =
    30
```

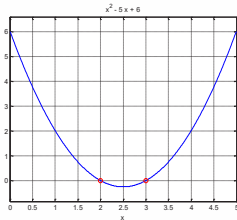
- f. Bentuk faktor dari fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$
 >> factor(f)
 ans =
 (x - 2) * (x - 3)

- g. Menentukan titik potong fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$ pada sumbu x

```
>> akar=solve(f)
akar =
     2
     3
```

- h. Melukiskan posisi titik potong fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$ pada sumbu x

```
>> hold on
>> plot(3,0,'or')
>> hold on
>> plot(2,0,'or')
```



- i. Menentukan koefisien dari fungsi polinomial $f(x) = x^2 - 5x + 6$

```
>> sym2poly(f)
ans =
     1     -5     6
```

- j. Mendefinisikan fungsi $g(x) = \frac{x^2 - 5x + 6}{x - 2}$

```
>> g=(x^2-5*x+6)/(x-2)
g =
(x^2 - 5*x + 6)/(x - 2)
```

- k. Menuliskan dalam bentuk yang lebih baik

$$g(x) = \frac{x^2 - 5x + 6}{x - 2}$$

```
>> pretty(g)
```

$$\frac{x^2 - 5x + 6}{x - 2}$$

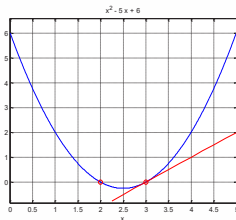
- l. Menyederhanakan bentuk fungsi $g(x) = \frac{x^2 - 5x + 6}{x - 2}$

```
>> simplify(g)
ans =
x - 3
```

- m. Menggambarkan grafik fungsi $g(x) = \frac{x^2 - 5x + 6}{x - 2}$

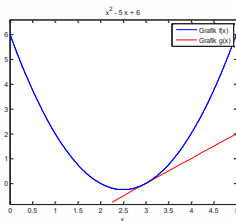
dengan warna merah pada domain $0 \leq x \leq 5$ dengan $\Delta x = 0,25$ bersamaan dengan grafik fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$ sebelumnya.

```
>> hold on
>> d=[0:0.25:5];
>> plot(d,subs(g,d),'r')
```



- n. Menuliskan keterangan grafik

```
>> legend('Grafik f(x)', 'Grafik g(x)')
```



- o. Penjumlahan $f(x) + g(x)$

```
>> f+g
ans =
(x^2 - 5*x + 6)/(x - 2) - 5*x + x^2 + 6
>> pretty(f+g)
      2
x  - 5 x + 6      2
----- - 5 x + x  + 6
x - 2
```

```
>> simplify(f+g)
ans =
(x - 1)*(x - 3)
```

p. Pembagian $f(x):g(x)$

```
>> f/g
ans =
x - 2
```

q. Perkalian $f.g$

```
>> f*g
ans =
(x^2 - 5*x + 6)^2/(x - 2)
>> pretty(f*g)
```

$$\frac{(x^2 - 5x + 6)^2}{x - 2}$$

```
>> simplify(f*g)
ans =
(x - 2)*(x - 3)^2
```

r. Invers fungsi fungsi $g(x)$ atau $1/g(x)$

```
>> inv(g)
ans =
(x - 2)/(x^2 - 5*x + 6)
>> pretty(inv(g))
```

$$\frac{x - 2}{x^2 - 5x + 6}$$

s. Komposisi fungsi $g(f(x))$

```
>> subs(g, f);
>> pretty(subs(g, f))
```

$$\frac{25x^2 + (x^2 - 5x + 6)^2 - 5x^2 - 24}{x^2 - 5x + 4}$$

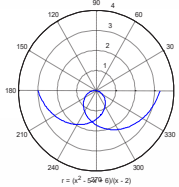
t. Komposisi fungsi $f(g(x))$

```
>> subs(f, g);
>> pretty(subs(f, g))
```

$$\frac{(x^2 - 5x + 6)^2}{(x - 2)} - \frac{5(x^2 - 5x + 6)}{x - 2} + 6$$

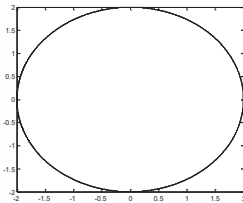
- u. Menggambar fungsi $g(x)$ dalam bentuk sistem koordinat polar

```
>> ezpolar(g)
```



- v. Menggambar lingkaran $x^2 + y^2 = 4$

```
>> d=-10:0.001:10;  
>> x=2*cos(d);  
>> y=2*sin(d);  
>> plot(x,y,'k')
```



2. Mendefinisikan Fungsi Berdasarkan Data

Selain dengan menggunakan bentuk syms, maka teknik komputasi untuk membangun fungsi dan grafik berdasarkan suatu data yang diketahui dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Mendefinisikan domain fungsi

$$x = \{3,3,4,6,7,8,5,7,9,10,11,9,12,8,7,12,13,8,13,15\}$$

```
>> x=[3 3 4 6 7 8 5 7 9 10 11 9 12 8 7 12 13 8 13 15]
x =
Columns 1 through 15
     3     3     4     6     7     8     5     7     9    10    11     9    12     8     7
Columns 16 through 20
    12    13     8    13    15
>> |
```

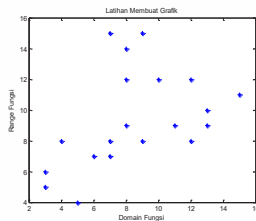
b. Mendefinisikan *range* fungsi

$$f = \{6,5,8,7,7,9,4,8,15,12,9,8,8,14,15,12,10,12,9,11\}$$

```
>> f=[6 5 8 7 7 9 4 8 15 12 9 8 8 14 15 12 10 12 9 11]
f =
Columns 1 through 15
     6     5     8     7     7     9     4     8    15    12     9     8     8    14    15
Columns 16 through 20
    12    10    12     9    11
```

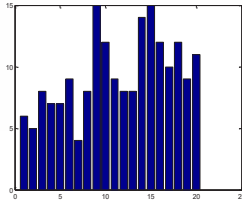
- 1) Menggambar grafik fungsi dengan tanda *
- 2) Membuat keterangan absis
- 3) Membuat keterangan ordinat
- 4) Membuat keterangan ordinat
- 5) Membuat judul grafik

```
>> plot(x,f,'*')
>> xlabel('Domain Fungsi')
>> ylabel('Range Fungsi')
>> title('Latihan Membuat Grafik')
```



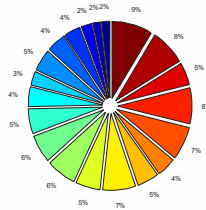
c. Melukiskan grafik dalam bentuk batang garis

```
>> bar(f)
```



- d. Menggambar grafik f pada domain x dengan bentuk diagram lingkaran

```
>> pie(x, f)
```



3. Mendefinisikan Fungsi Polynomial Berdasarkan Koefisien Persamaan

Apabila dalam fungsi polynomial, diketahui koefisien fungsinya, maka kita dapat mendefinisikan persamaan fungsi dan menggambar grafik serta teknik komputasi lainnya dengan cara sebagai berikut:

- a. Pendefinisian fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

```
>> f=[1 -5 6]
```

```
f =
```

```
    1    -5     6
```

- b. Menghitung nilai $f(0)$

```
>> polyval(f,0)
```

```
ans =
```

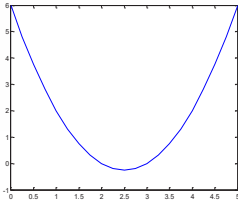
```
    6
```

- c. Menggambar grafik f pada domain $0 \leq x \leq 5$ dengan $\Delta x = 0,25$

```
>> x=0:0.25:5;
```

```
>> y=polyval(f,x);
```

```
>> plot(x,y)
```



d. Menentukan akar persamaan dari $f(x)$

```
>> roots(f)
ans =
    3.0000
    2.0000
```

e. Menuliskan persamaan fungsi

```
>> poly2sym(f)
ans =
x^2 - 5*x + 6
```

4. Mendefinisikan Fungsi Trigonometri

Pendefinisian fungsi trigonometri dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

a. Mendefinisikan domain fungsi sinus

```
>> syms x
>> f=sin(x)
f =
sin(x)
```

b. Menghitung nilai dari $\sin 30$

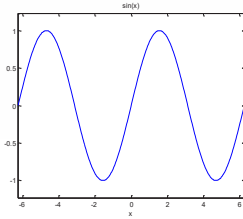
```
>> subs(f,30)
ans =
-0.9880
```

c. Menghitung nilai dari $\sin 30^\circ$

```
>> subs(f,30.*pi./180)
ans =
0.5000
```

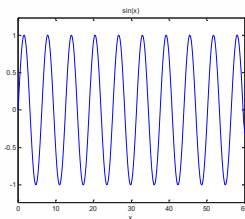
d. Menggambar contoh grafik fungsi sinus

```
>> ezplot(f)
```



e. Menggambar grafik fungsi f pada domain $0 \leq x \leq 60$

```
>> x=0:60;
>> ezplot(f,x)
```



f. Bentuk jumlah sinus

```
>> expand(sin(x+y))
ans =
cos(x)*sin(y) + cos(y)*sin(x)
```

g. Bentuk selisih sinus

```
>> expand(sin(x-y))
ans =
cos(y)*sin(x) - cos(x)*sin(y)
```

h. Bentuk jumlah kosinus

```
>> expand(cos(x+y))
ans =
cos(x)*cos(y) - sin(x)*sin(y)
```

i. Bentuk selisih kosinus

```
>> expand(cos(x-y))
ans =
cos(x)*cos(y) + sin(x)*sin(y)
```

j. Bentuk jumlah tangen

```
>> pretty(expand(tan(x+y)))
      tan(x) + tan(y)
-----
tan(x) tan(y) - 1
```

k. Bentuk selisih tangent

```
>> pretty(expand(tan(x-y)))
      tan(x) - tan(y)
      -----
      tan(x) tan(y) + 1
```

l. Bentuk perkalian skalar

```
>> expand([sin(2*x), cos(2*y)])
ans =
[ 2*cos(x)*sin(x), 2*cos(y)^2 - 1]
```

m. Bentuk sederhana dari $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$

```
>> simplify(sin(x)^2+cos(x)^2)
ans =
1
```

Dengan cara yang sama, dapat dikonstruksi untuk fungsi trigonometri lainnya.

Latihan

1. Pendefinisian Fungsi dan Operasi Dasar

- Definisikan fungsi $f(x) = x^4 - 3x^3 + 2x^2 - x + 1$.
- Hitung nilai $f(2)$ dan $f(-1)$.
- Gambar grafik fungsi $f(x)$ pada domain $-3 \leq x \leq 3$.
- Tentukan akar-akar persamaan $f(x) = 0$.
- Sederhanakan bentuk $(x^2 + 1)f(x) - (x - 1)^3$.

2. Manipulasi Matriks

- Buat matriks A berordo 4×4 dengan elemen-elemen random.
- Hitung invers matriks A (jika ada).
- Temukan determinan matriks A .
- Transpose matriks A .
- Kalikan matriks A dengan matriks B yang didefinisikan sebagai berikut:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 15 & 16 \end{bmatrix}$$

3. Operasi Trigonometri
 - a. Definisikan fungsi $g(x) = \cos(3x) + \sin(2x)$.
 - b. Hitung nilai $g(\frac{\pi}{3})$ dan $g(\pi)$.
 - c. Gambar grafik fungsi $g(x)$ pada domain $0 \leq x \leq 2\pi$.
 - d. Temukan nilai x pada interval $0 \leq x \leq 2\pi$ yang memenuhi persamaan $g(x) = 1$.
 - e. Buktikan identitas trigonometri $\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1$ menggunakan MATLAB.
4. Manipulasi Data dan Statistik
 - a. Buatlah dataset berisi nilai tinggi badan dan berat 20 orang.
 - b. Hitung rata-rata, median, dan standar deviasi tinggi badan dan berat badan.
 - c. Buatlah scatter plot untuk menunjukkan hubungan antara tinggi dan berat badan.
 - d. Temukan persamaan garis regresi linier untuk memprediksi berat badan berdasarkan tinggi badan.
 - e. Hitung koefisien korelasi antara tinggi badan dan berat badan.
5. Pemrograman Sederhana
 - a. Buatlah program untuk menghitung volume dengan rumus $\text{volume} = 4/3\pi r^3$.
 - b. Buatlah program untuk menentukan nilai minimum dan maksimum dari lima bilangan yang diinputkan pengguna.

- c. Buatlah program untuk mengonversi nilai mata uang Rupiah ke Dollar dan sebaliknya.
- d. Buatlah program untuk menghitung akar-akar persamaan kubik $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$.
- e. Buatlah program untuk mencetak tabel perkalian dari 1 sampai 20.

BAB II PEMROGRAMAN KALKULUS DASAR PADA COMMAND WINDOW MATLAB

Pada pembahasan sebelumnya, telah dibahas pemrograman *Command Window* untuk mendefinisikan fungsi matematika. Setiap pembaca harus harus dapat memastikan dirinya bahwa materi sebelumnya tersebut telah tuntas dikuasai. Pada bab ini akan dibahas bagaimana pemrograman untuk kalkulus dasar pada *Command Window*.

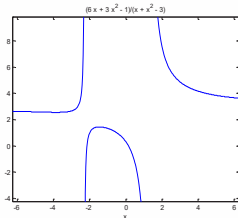
A. Pemrograman Limit Fungsi

1. Pendefinisian fungsi rasional $f(x) = \frac{3x^2 + 6x - 1}{x^2 + x - 3}$

```
>> syms x
>> f1=3*x^2+6*x-1;
>> f2=x^2+x-3;
>> f=f1/f2
f =
(3*x^2 + 6*x - 1)/(x^2 + x - 3)
>> pretty(f)
      2
  3 x  + 6 x - 1
  -----
      2
    x  + x - 3
```

2. Gambar grafik fungsi $f(x)$

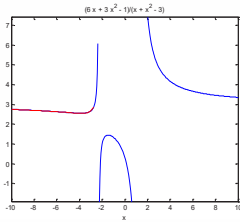
```
>> ezplot(f)
```



3. Menghitung nilai $\lim_{x \rightarrow -3^-} f(x)$

```
>> limit(f, x, -3, 'left')
```

- ```
ans =
8/3
```
4. Menghitung nilai  $\lim_{x \rightarrow 3^+} f(x)$
- ```
>> limit(f,x,-3,'right')
ans =
8/3
```
5. Menghitung nilai $\lim_{x \rightarrow 3} f(x)$
- ```
>> limit(f,-3)
ans =
8/3
```
6. Menghitung nilai  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$
- ```
>> limit(f,x,inf)
ans =
3
```
7. Menghitung nilai $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$
- ```
>> limit(f,x,-inf)
ans =
3
```
8. Hitung  $\lim_{x \rightarrow -2.7399^-} f(x)$
- ```
>> double(limit(f,x,-2.7399,'left'))
ans =
2.8757
```
9. Hitung $\lim_{x \rightarrow -2.7399^+} f(x)$
- ```
>> double(limit(f,x,-2.7399,'right'))
ans =
2.8757
```
10. Simulasi  $\lim_{x \rightarrow -2.7399^-} f(x)$
- ```
>> x=-10:0.25:-2.7399;
>> ezplot(f,[-10,10])
>> hold on
>> plot(x,subs(f,x),'r')
```



B. Menentukan Asimtot Kurva

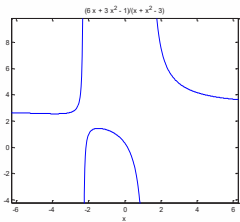
1. Definisikan fungsi $f(x) = \frac{3x^2 + 6x - 1}{x^2 + x - 3}$

```
>> syms x
>> f1=3*x^2+6*x-1;
>> f2=x^2+x-3;
>> f=f1/f2;
>> pretty(f)
```

$$\frac{3x^2 + 6x - 1}{x^2 + x - 3}$$

2. Gambar grafik fungsi $f(x)$

```
>> ezplot(f)
```



3. Menentukan asimtot horizontal kurva

```
>> y=limit(f,inf)
```

```
y =
```

```
3
```

4. Menentukan asimtot vertikal kurva

```
>> x=solve(f2)
```

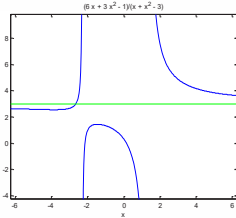
```
x =
```

$$13^{(1/2)}/2 - 1/2$$

$$- 13^{(1/2)}/2 - 1/2$$

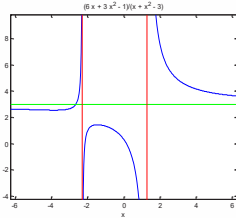
5. Menggambar garis asimtot horizontal

```
>> hold on
>> plot([-2*pi 2*pi],[3 3], 'g')
```



6. Menggambar garis asimtot vertikal

```
>> plot(double(x(1))*[1 1],[-5 10], 'r')
>> plot(double(x(2))*[1 1],[-5 10], 'r')
```



C. Menentukan Nilai Maksimum dan Minimum Kurva

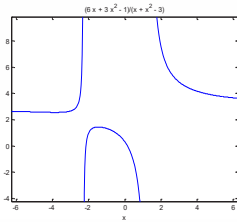
1. Definisikan fungsi $f(x) = \frac{3x^2 + 6x - 1}{x^2 + x - 3}$

```
>> syms x
>> f1=3*x^2+6*x-1;
>> f2=x^2+x-3;
>> f=f1/f2;
>> pretty(f)
```

$$\frac{3x^2 + 6x - 1}{x^2 + x - 3}$$

2. Gambar grafik fungsi $f(x)$

```
>> ezplot(f)
```



3. Mencari turunan pertama dari $f(x)$

```
>> df=diff(f);
>> pretty(df)
```

$$\frac{6x + 6}{x^2 + x - 3} - \frac{(2x + 1)(3x^2 + 6x - 1)}{(x^2 + x - 3)^2}$$

4. Mencari nilai x sehingga $df(x) = 0$

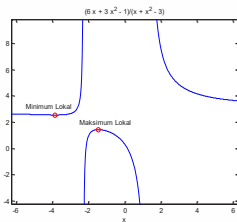
```
>> x=solve(df)
x =
```

$$13^{1/2}/3 - 8/3$$

$$- 13^{1/2}/3 - 8/3$$

5. Menggambar koordinat ekstrik kemudian menuliskan keterangan posisi minumum lokal dan keterangan posisi maksimum lokal

```
>> hold on
>> plot(double(x),double(subs(f,x)), 'ro')
>> text(-5.5,3.2,'Minimum Lokal')
>> text(-2.5,2,'Maksimum Lokal')
```



D. Pemrograman Turunan Fungsi dan Garis Singgung Kurva

1. Definisikan x dan h sebagai simbol matematika

```
>> syms x h
```

2. Menentukan nilai

```
>> limit((sin(x+h)-sin(x))/h,h,0)
```

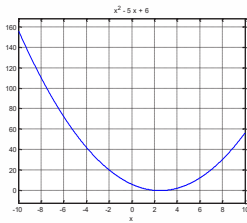
```
ans =  
cos(x)
```

3. Pendefinisian fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

```
>> syms x  
>> f=x^2-5*x+6  
f =  
x^2 - 5*x + 6
```

4. Menggambar grafik fungsi $f(x)$ pada domain $-10 \leq x \leq 10$

```
>> ezplot(f, [-10,10])  
>> grid on
```



5. Turunan pertama dari fungsi f dan sebut hasilnya sebagai fungsi df

```
>> df=diff(f)  
df =  
2*x - 5
```

6. Turunan ke-2 dari fungsi f

```
>> diff(f,2)  
ans =  
2
```

7. Menentukan nilai x sehingga $f(x)$ minimum

```
>> x=solve(df)  
x =  
5/2
```

8. Menuliskan dalam bentuk desimal dari x

```
>> x=double(x)  
x =  
2.5000
```

9. Menghitung nilai minimum fungsi

```
>> fmin=subs(f,x)  
fmin =  
-0.2500
```

10. Menentukan kemiringan kurva pada titik $x = 3,5$

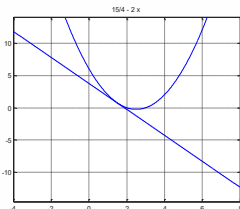
```
>> m=subs(df,3.5)
m =
     2
```

11. Persamaan garis singgung kurva pada titik $(1,5;f(1,5))$ dan disebut sebagai g

```
>> syms x
>> a=1.5;
>> b=subs(f,a);
>> m=subs(df,a);
>> g=m*(x-a)+b
g =
15/4 - 2*x
```

12. Menggambar garis singgung kurva $f(x)$ pada titik $(1,5;f(1,5))$

```
>> ezplot(f,[-4,8])
>> hold on
>> ezplot(g,[-4,8])
>> grid on
```



13. Mendefinisikan fungsi implisit $x^2 + y^2 = 4$

```
>> syms x y
>> h=x^2+y^2-4;
>> pretty(h)
      2      2
     x  + y  - 4
```

14. Turunan fungsi implisit dari $x^2 + y^2 = 4$ terhadap x dan turunan fungsi implisit dari $x^2 + y^2 = 4$ terhadap y

```
>> diff(h,x)
ans =
2*x
>> diff(h,y)
ans =
2*y
```

E. Pemrograman Integral Fungsi dan Luas Daerah di Bawah Kurva

1. Pendefinisian fungsi $f(x) = x^2 - 5x + 6$

```
>> syms x
>> f=x^2-5*x+6
f =
x^2 - 5*x + 6
```

2. Mendefinisikan hasil integral dari f sebagai fungsi dalam

```
g
>> g=int(f)
g =
(x*(2*x^2 - 15*x + 36))/6
```

3. Menuliskan dalam bentuk yang lebih bagus formula fungsi g

```
>> pretty(g)
      2
x (2 x  - 15 x + 36)
-----
      6
```

4. Menghitung nilai $\int_0^5 f(x)dx$

```
>> int(f,0,5)
ans =
55/6
```

5. Menuliskan bentuk $55/6$ ke dalam bentuk desimal

```
>> double(55/6)
ans =
9.1667
```

6. Membuat domain fungsi pada interval $0 \leq x \leq 5$ dengan $\Delta x = 0,25$

```
>> x=0:0.25:5

x =

Columns 1 through 5

    0    0.2500    0.5000    0.7500    1.0000
```

```

Columns 6 through 10
    1.2500    1.5000    1.7500    2.0000    2.2500

Columns 11 through 15
    2.5000    2.7500    3.0000    3.2500    3.5000

Columns 16 through 20
    3.7500    4.0000    4.2500    4.5000    4.7500

Column 21
    5.0000

```

7. Membuat range fungsi $f(x)$

```
>> y=subs(f,x)
```

```
y =
```

```

Columns 1 through 5
    6.0000    4.8125    3.7500    2.8125    2.0000

Columns 6 through 10
    1.3125    0.7500    0.3125         0   -0.1875

Columns 11 through 15
   -0.2500   -0.1875         0    0.3125    0.7500

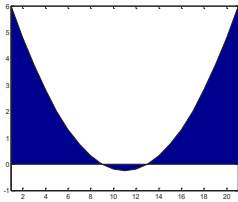
Columns 16 through 20
    1.3125    2.0000    2.8125    3.7500    4.8125

Column 21
    6.0000

```

8. Menggambar grafik fungsi $f(x)$ pada domain x dengan di bawah kurvanya diarsir

```
>> area(y)
```



9. Menghitung luas di bawah kurva $f(x)$ pada domain $0 \leq x \leq 5$ dengan $\Delta x = 0,25$.

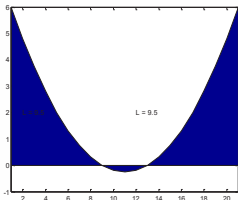
```
>> area(y)
>> L=double(int(f,0,2)+abs(int(f,2,3))+int(f,3,5))
```

L =

9.5000

10. Menuliskan keterangan luas daerah pada kurva pada koordinat (2,2)

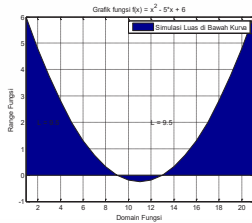
```
>> text(12,2,['L = ',num2str(double(L))])
```



11. Tambahkan:

- Menuliskan keterangan pada sumbu x (absis)
- Menuliskan keterangan pada sumbu y (ordinat)
- Menuliskan judul fungsi
- Melukiskan garis koordinat
- Membuat keterangan

```
>> text(2,2,['L = ',num2str(double(L))])
>> text(12,2,['L = ',num2str(double(L))])
>> xlabel('Domain Fungsi')
>> ylabel('Range Fungsi')
>> title(['Grafik fungsi f(x) = ',char(f)])
>> grid on
>> legend('Simulasi Luas di Bawah Kurva')
```



12. Mendefinisikan fungsi implisit $x^2 + y^2 = 4$

```
>> syms x y
>> h=x^2+y^2-4;
>> pretty(h)
      2      2
x  + y  - 4
```

13. Integral fungsi implisit $x^2 + y^2 = 4$ terhadap x

```
>> pretty(int(h,x))
      3
x      2
-- + (y  - 4) x
      3
```

14. Integral fungsi implisit $x^2 + y^2 = 4$ terhadap y

```
>> pretty(int(h,y))
      3
y      2
-- + (x  - 4) y
      3
```

Latihan

1. Integrasikan fungsi implisit $x^2 + y^2 = 4$ terhadap x .
2. Hitung nilai dari $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(2+h) - \sin(2)}{h}$.
3. Tentukan nilai maksimum dan minimum dari fungsi $f(x) = x^3 - 3x^2 - 9x + 5$ pada interval $[-2,4]$.
4. Gambar grafik fungsi $f(x) = \frac{x^3 + 2x^2 - 5x + 6}{x^2 - 4}$ pada Command Window MATLAB.
5. Hitung integral dari fungsi $f(x) = 4x^2 - 3x + 2$ terhadap x pada interval $[0,3]$.

BAB III

PEMROGRAMAN MATRIKS PADA *COMMAND WINDOW* MATLAB

Matriks merupakan susunan data yang disajikan dalam bentuk baris dan kolom. Dalam berbagai bidang keilmuan, konsep matriks umumnya selalu dipergunakan. Seperti tabulasi data, jadwal kegiatan, *graph*, sistem persamaan linier dan lain sebagainya. Matematika sebagai konsep berpikir, merupakan metode ilmiah yang rasional untuk memudahkan penyelesaian permasalahan kehidupan dengan matriks. MATLAB sebagai pemrograman dengan bahasa dasar berbasis matriks, memberikan berbagai teknik komputasi. Berikut diberikan teknik komputasi matriks MATLAB. Pembaca diharapkan sudah memiliki pengetahuan dasar-dasar matriks sebagaimana yang diuraikan dalam aljabar linier dan lain-lain.

A. Operasi Tunggal (*Uner*)

1. Pendefinisian matriks dalam bentuk satu baris

```
>> A=[13 54 23 78 21]
A =
    13    54    23    78    21
```

2. Transpose matriks *A*

```
>> A'
ans =
    13
    54
    23
    78
    21
```

3. Pendefinisian matriks dalam bentuk satu kolom

```
>> B=[13;45;63;78;98;76]
B =
    13
    45
    63
```

```
78
98
76
```

4. Transpose matriks *B*

```
>> B'
ans =
    13    45    63    78    98    76
```

5. Mendefinisikan matriks dalam bentuk 3 baris dan 4 kolom

```
>> C=[3 4 2 6;5 8 9 2;4 5 6 7]
C =
     3     4     2     6
     5     8     9     2
     4     5     6     7
```

6. Transpose matriks *C*

```
>> C'
ans =
     3     5     4
     4     8     5
     2     9     6
     6     2     7
```

7. Mengambil elemen baris ke-2 kolom ke-3 matriks *C*

```
>> C(2,3)
ans =
     9
```

8. Mengambil elemen matriks pada baris ke-3 dari matriks *C*

```
>> C(3,:)
ans =
     4     5     6     7
```

9. Mengambil elemen matriks pada kolom ke-2 dari matriks *C*

```
>> C(:,2)
ans =
     4
     8
     5
```

10. Mengambil elemen matriks *C* pada baris terakhir

```
>> C(end,:)
ans =
     4     5     6     7
```

11. Mengambil elemen matriks C pada kolom terakhir

```
>> C(:,end)
ans =
     6
     2
     7
```

12. Mengambil elemen matriks C pada kolom terakhir dari baris ke-1 sampai baris ke-2

```
>> C(1:2,:)
ans =
     3     4     2     6
     5     8     9     2
```

13. Mengambil elemen matriks C dari kolom ke-2 sampai kolom ke-3

```
>> C(:,2:3)
ans =
     4     2
     8     9
     5     6
```

14. Mengambil elemen matriks C dari baris ke-2 sampai dengan baris ke-3 dan kolom ke-3 sampai dengan kolom ke-4

```
>> C(2:3,3:4)
ans =
     9     2
     6     7
```

15. Menghapus elemen matriks C pada kolom ke-2

```
>> C(:,2)=[]
C =
     3     2     6
     5     9     2
     4     6     7
```

16. Menjumlahkan elemen pada kolom matriks C

```
>> sum(C)
ans =
    12    17    15
```

17. Menjumlahkan elemen pada kolom transpose matriks C

```
>> sum(C')
ans =
    11    16    17
```

18. Menghitung determinan matriks C

```
>> det(C)
ans =
    63
```

19. Menentukan invers matriks C

```
>> inv(C)
ans =
    0.8095    0.3492   -0.7937
   -0.4286   -0.0476    0.3810
   -0.0952   -0.1587    0.2698
```

20. Menghitung eigen value matriks C

```
>> eig(C)
ans =
    14.9286
    2.0357 + 0.2758i
    2.0357 - 0.2758i
```

21. Menentukan eigen value dan vektor eigen dari matriks C

```
>> [v,e]=eig(C)
```

v =

```
    0.4382         0.8001         0.8001
    0.5964    -0.5927 - 0.0376i   -0.5927 + 0.0376i
    0.6725     0.0690 + 0.0493i     0.0690 - 0.0493i
```

e =

```
    14.9286         0         0
         0     2.0357 + 0.2758i         0
         0         0     2.0357 - 0.2758i
```

22. Membentuk matriks nol satu baris 5 kolom

```
>> zeros(1,5)
ans =
     0     0     0     0     0
```

23. Membentuk matriks nol 4 baris 1 kolom

```
>> zeros(4,1)
ans =
     0
     0
     0
     0
```

24. Membentuk matriks 0 dengan 4 baris dan 5 kolom

```
>> zeros(4,5)
```

```
ans =
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0
```

25. Membentuk matriks satuan dengan 1 baris dan 5 kolom

```
>> ones(1,5)
ans =
    1    1    1    1    1
```

26. Membentuk matriks satuan dengan 4 baris dan 1 kolom

```
>> ones(4,1)
ans =
    1
    1
    1
    1
```

27. Membentuk matriks satuan dengan 4 baris dan 5 kolom

```
>> ones(4,5)
ans =
    1    1    1    1    1
    1    1    1    1    1
    1    1    1    1    1
    1    1    1    1    1
```

28. Membuat matriks identitas berukuran 3 baris dan 3 kolom

```
>> eye(3,3)
ans =
    1    0    0
    0    1    0
    0    0    1
```

B. Operasi *Biner* pada Matriks

1. Mendefinisikan matriks *A* dan *B*

```
>> A=[1 2 3;5 4 3;6 7 4]
A =
    1    2    3
    5    4    3
    6    7    4
>> B=[5 4 3;8 6 2;0 9 8]
B =
    5    4    3
    8    6    2
    0    9    8
```

2. Menentukan nilai dari $C = A + B$

```
>> C=A+B
C =
     6     6     6
    13    10     5
     6    16    12
```

3. Menentukan nilai dari $D = A - B$

```
>> D=A-B
D =
    -4    -2     0
    -3    -2     1
     6    -2    -4
```

4. Menentukan hasil dari perkalian skalar konstanta dengan matriks

```
>> 2*A
ans =
     2     4     6
    10     8     6
    12    14     8
```

5. Menentukan hasil perkalian skalar dua buah matriks

```
>> A.*B
ans =
     5     8     9
    40    24     6
     0    63    32
```

6. Menentukan hasil dari perkalian dua buah matriks

```
>> A*B
ans =
    21    43    31
    57    71    47
    86   102    64
```

7. Menggabungkan matriks A dan B berdasarkan kolom

```
>> [A B]
ans =
     1     2     3     5     4     3
     5     4     3     8     6     2
     6     7     4     0     9     8
```

8. Menggabungkan matriks A dan B berdasarkan baris

```
>> [A;B]
ans =
     1     2     3
     5     4     3
     6     7     4
     5     4     3
     8     6     2
     0     9     8
```

9. Menyelesaikan koefisien SPL

$$x_1 + x_2 - 3x_3 = 5$$

$$2x_1 - 4x_2 - x_3 = 8$$

$$x_1 - 5x_2 + x_3 = 12$$

Kedalam bentuk matriks

```
>> A=[1 1 -3;2 -4 -1;1 -5 1]
```

```
A =
     1     1    -3
     2    -4    -1
     1    -5     1
```

```
>> B=[5;8;12]
```

```
B =
     5
     8
    12
```

10. Menentukan solusi SPL dengan menggunakan metode invers matriks

```
>> X=inv(A)*B
```

```
X =
 -14.8333
  -7.1667
  -9.0000
```

11. Menentukan solusi SPL dengan metode pembagian matriks

```
>> X=A\B
```

```
X
 -14.8333
  -7.1667
  -9.0000
```

12. Memeriksa kesamaan dua buah matriks

```
>> isequal(A,B)
```

```
ans =
     0
>> isequal(A,A)
ans =
     1
```

13. Membentuk matriks dekomposisi LU dari matriks A

```
>> [L U P]=lu(A)
L =
    1.0000         0         0
    0.5000    1.0000         0
    0.5000   -1.0000    1.0000

U =
    2.0000   -4.0000   -1.0000
         0    3.0000   -2.5000
         0         0   -1.0000

P =
     0     1     0
     1     0     0
     0     0     1
```

14. Memeriksa $L*U$

```
>> L*U
ans =
     2     -4     -1
     1      1     -3
     1     -5      1
```

15. Memeriksa $P*A$

```
>> P*A
ans =
     2     -4     -1
     1      1     -3
     1     -5      1
```

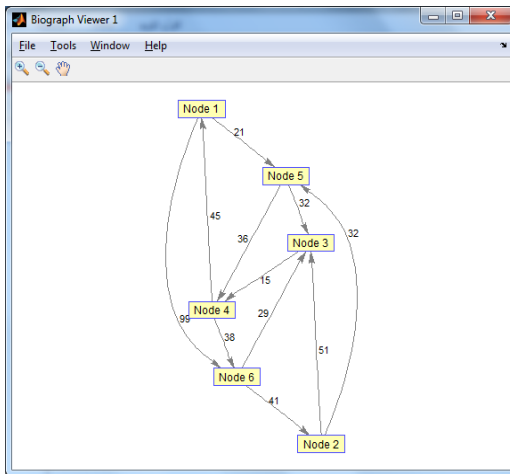
16. Menuliskan matriks jarak dari suatu *graph* berarah

```
>> Asal=[4 6 2 5 6 3 5 1 2 1 4];
>> Tujuan=[1 2 3 3 3 4 4 5 5 6 6];
>> Jarak=[45 41 51 32 29 15 36 21 32 99 38];
>> G=sparse(Asal,Tujuan,Jarak)
G =
    (4,1)         45
    (6,2)         41
    (2,3)         51
    (5,3)         32
```

```
(6, 3)      29
(3, 4)      15
(5, 4)      36
(1, 5)      21
(2, 5)      32
(1, 6)      99
(4, 6)      38
```

17. Membuat gambar graph berarah dari titik asal ke titik tujuan

```
>> view(biograph(G, [], 'ShowWeights', 'on'))
```



18. Menulis matriks lintasan jarak terpendek

```
>> graphallshortestpaths(G)
```

```
ans =
    0   136   53   57   21   95
   111    0   51   66   32  104
    60   94    0   15   81   53
    45   79   67    0   66   38
    81  115   32   36    0   74
    89   41   29   44   73    0
```

19. Menentukan matriks Jacobian dari SPNL berikut

$$2x^2 - 3y + z^3 = 5$$

$$4x + 3y^3 + 2\sin(z) = 2$$

$$xy - y^2 + 5z = 9.5$$

```
syms x y z
```

```
M=[2*x^2-3*y+z^3-5; ...
```

```

4*x+3*y^3+2*sin(z)-12;...
x*y-y^2+5*z-9.5];
>> J=jacobian(M)
J =
[ 4*x,      -3,      3*z^2]
[ 4,      9*y^2,  2*cos(z)]
[ y,  x - 2*y,      5]

```

20. Mensubstitusikan nilai $x = 0$

```

>> Jx=subs(J,0)
Jx =
[ 0,      -3,      3*z^2]
[ 4,  9*y^2,  2*cos(z)]
[ y,  -2*y,      5]

```

21. Mensubstitusikan nilai $y = 0$

```

>> Jxy=subs(Jx,0)
Jxy =
[ 0, -3,      3*z^2]
[ 4,  0,  2*cos(z)]
[ 0,  0,      5]

```

22. Mensubstitusikan nilai $z = 0$

```

>> Jxyz=subs(Jxy,0)
Jxyz =
0      -3      0
4      0      2
0      0      5

```

Latihan

1. Tentukan solusi dari persamaan linier berikut menggunakan metode pembagian matriks:

$$2x + 3y = 10$$

$$4x - 2y = 8$$

2. Diberikan matriks J :

$$J = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 9 \\ 12 & 15 & 18 \\ 21 & 24 & 27 \end{bmatrix}$$

Hitung matriks Jacobian dari J terkait dengan persamaan $x^2 - y^2 + z = 10$, $xy + z = 5$, dan $z^2 = 25$.

3. Diberikan matriks K dan L sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} \qquad L = \begin{bmatrix} 7 & 8 \\ 9 & 10 \\ 11 & 12 \end{bmatrix}$$

4. Jika matriks M adalah sebagai berikut:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 2 & 5 & 8 \\ 3 & 6 & 9 \end{bmatrix}$$

Tentukan invers dari M .

5. Hitung determinan dari matriks N :

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 15 & 16 \end{bmatrix}$$

BAB IV

PEMROGRAMAN STRUKTUR *IF-ELSEIF-ELSE-END* PADA *M-FILE* MATLAB

Dalam bahasa Inggris, *if* berarti jika dalam bahasa pemrograman komputer digunakan untuk mengontrol suatu kondisi. Sintaks dasar struktur *if* adalah sebagai berikut:

```
if ekspresi logika  
    perintah  
elseif ekspresi logika  
    perintah  
else  
    perintah  
end
```

Logika yang digunakan disini adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Simbol dan Makna Logika

Simbol	Makna Logika
==	Sama dengan
<=	Kurang dari atau sama dengan
>=	Lebih dari atau sama dengan
<	Kurang dari
>	Lebih dari
&	Dan (Konjungsi)
	Atau (Disjungsi)
~	Tidak (Negasi)
~=	Tidak sama dengan

Contoh 4.1:

Buatlah algoritma komputasi menggunakan MATLAB untuk mensimulasikan sifat Trikotomi.

Solusi:

Konstruksi algoritma program dengan bahasa MATLAB adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
x=input('x = ');
y=input('y = ');
if x==y
    disp('x sama dengan y')
elseif x>y
    disp('x lebih dari y')
else
    disp('x kurang dari y')
end
```

Jika dijalankan, maka diperoleh hasil eksekusi atau *output* program adalah sebagai berikut:

```
x = 4
y = 6
x kurang dari y
x = 6
y = 4
x lebih dari y
x = 4
y = 4
x sama dengan y
```

Jika menghendaki *output* program, tertulis tidak sebagai *x* dan *y*, tetapi langsung bilangannya, maka perintah `disp` akan dirubah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
x=input('x = ');
y=input('y = ');
if x==y
    disp([num2str(x), ' sama dengan ', ...
          num2str(y)])
elseif x>y
    disp([num2str(x), ' lebih dari ', ...
          num2str(y)])
else
    disp([num2str(x), ' kurang dari ', ...
```

```

        num2str(y)])
end

```

Output programnya adalah sebagai berikut:

```

x = 5
y = 7
5 kurang dari 7
x = 7
y = 5
7 lebih dari 5
x = 8
y = 8
8 sama dengan 8

```

Penulisan `disp('x kurang dari y')` berarti bahwa, komputer diperintahkan untuk menulis (`disp = display`) suatu kata-kata atau string yang tertulis di antara tanda petik. Penulisan ini dapat disempurnakan dengan `disp([num2str(x), ' kurang dari ', num2str(y)])` terbaca sebagai *numeric to string* yang berarti bahwa dilakukan konversi dari x yang berekstensi *numeric* pada inputan diubah menjadi *string*. Hal ini dilakukan karena penulisan `disp` merupakan suatu perintah untuk menuliskan suatu ekstensi data *string* atau kata-kata.

Contoh 5.2

Buatlah algoritma komputasi untuk menentukan akar-akar persamaan kuadrat.

Solusi:

```

clear all
clc
close all

a=input('a = ');
b=input('b = ');
c=input('c = ');
D=b^2-4*a*c;
x(1)=(-b+sqrt(D))/2*a;
x(2)=(-b-sqrt(D))/2*a;
if D>=0
    disp(['Akar bilangan real = ', num2str(x)])
else

```

```

        disp(['Akar bilangan kompleks = ', num2str(x)])
    end

```

Jika program tersebut dijalankan, maka akan diperoleh hasil sebagai berikut:

```

a = 1
b = 5
c = 6
Akar bilangan real = -2 -3
a = 5
b = 1
c = 6
Akar bilangan kompleks = -2.5+27.2718i -2.5-27.2718i
a = 1
b = -4
c = 3
Akar bilangan real = 3 1

```

Jika ingin menambahkan grafiknya, maka *script* program komputasinya ditambah setelah menghitung akar-akar persamaan sebagai berikut:

```

clear all
clc
close all

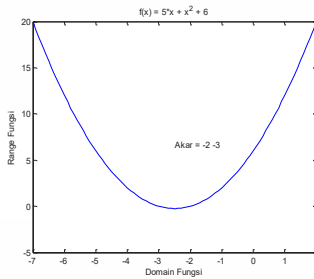
a=input('a = ');
b=input('b = ');
c=input('c = ');
D=b^2-4*a*c;
x(1)=(-b+sqrt(D))/2*a;
x(2)=(-b-sqrt(D))/2*a;
if D>=0
    disp(['Akar bilangan real = ', num2str(x)])
else
    disp(['Akar bilangan kompleks = ', num2str(x)])
end
X=x(1)-5:0.1:x(2)+5;
f=a.*X.^2+b.*X+c;
plot(X,f)
xlabel('Domain Fungsi')
ylabel('Range Fungsi')
title(['f(x) = ', char(poly2sym([a b c]))])
text(mean(X), mean(f), ['Akar = ', num2str(x)])

```

$X=x(1)-5:0.1:x(2)+5$; pada *script* program tersebut merupakan perintah membangun domain fungsi pada interval $x_1 - 5 \leq x \leq x_2 + 5$ dengan $\Delta x = 0,1$. $f=a.*X.^2+b.*X+c$; merupakan perintah untuk menentukan range dari fungsi $f(x) = ax^2 + bx + c$. $\text{plot}(X,f)$ merupakan perintah untuk menggambar grafik dengan domain X dan range f . $\text{xlabel}('Domain \text{ Fungsi}')$ berfungsi untuk menuliskan judul pada sumbu x grafik fungsi dengan kata-kata “Domain Fungsi”, sedangkan $\text{ylabel}('Range \text{ Fungsi}')$ berfungsi untuk menuliskan judul pada sumbu y dengan kata-kata “Range Fungsi”. $\text{title}(['f(x) = ', \text{char}(\text{poly2sym}([a \ b \ c]))])$ berfungsi untuk menuliskan judul dari grafik, dengan menuliskan bentuk fungsi grafik kuadrat dengan mengambil koefisien a , b , dan c . $\text{text}(\text{mean}(X), \text{mean}(f), ['Akar = ', \text{num2str}(x)])$ merupakan perintah untuk menuliskan akar-akar persamaan pada grafik fungsi pada koordinat di tengah sumbu x dan tengah sumbu y . Pembaca harus dapat memahami kode program, karena kesalahan titik saja akan membuat eksekusi program *error*. Penulisan kata-kata atau *string* ditulis dalam tanda petik, sedangkan bilangan untuk dikonversi dulu menjadi string dengan perintah `num2str`. Tanda kurung siku “[]” digunakan jika dalam penulisan string atau kata-kata akan memuat bilangan yang terkoversikan dengan `num2str` tersebut. Jika program tersebut dijalankan maka akan diperoleh hasil sebagai berikut:

```

a = 1
b = 5
c = 6
Akar bilangan real = -2 -3
  
```



Latihan

1. Buatlah program untuk menghitung nilai akhir siswa berdasarkan nilai tugas, MID, dan semester dengan bobot masing-masing 15%, 35%, dan 50%.
2. Buatlah program untuk menyelesaikan suatu bilangan, apakah termasuk bilangan positif atau tidak, dan bilangan prima atau tidak.
3. Buatlah program untuk menentukan nilai kebenaran berdasarkan logika negasi, konjungsi, disjungsi, implikasi, biimplikasi, konvers, invers, dan kontra posisi.

PEMROGRAMAN DENGAN STRUKTUR *FOR-END* PADA *M-FILE* MATLAB

Dalam penyelesaian persoalan matematika terdapat banyak kasus yang membutuhkan proses perhitungan berulang. Misalnya dalam menghitung nilai $n!$ yang terdefinisi sebagai perkalian bilangan asli dari 1 sampai dengan n . Secara matematis hal tersebut ditulis sebagai $n! = n \times (n - 1) \times (n - 2) \dots 2 \times 1$. Lebih lanjut $n!$ digunakan sebagai dasar untuk menghitung nilai permutasi dan kombinasi dimana dalam penerapannya untuk menentukan banyaknya titik sampel dalam suatu pengamatan dalam statistik peluang. Dalam kasus tersebut, parameter berhentinya proses perhitungan ditentukan dari banyaknya proses pengulangan. Misalnya untuk mendapatkan perhitungan $5!$ dilakukan proses pengulangan sebanyak 4 kali, yaitu $5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120$, sehingga $5! = 120$. Dalam bahasa pemrograman komputer, apabila parameter berhentinya proses pengulangan ditentukan dari banyaknya proses pengulangan, maka bahasa program yang dapat digunakan adalah struktur *for* dengan struktur

```
for i = awal:akhir
    perintah
end
```

Berikut dalam pembahasan di bawah ini, diberikan petunjuk algoritma komputasi untuk membangun bahasa pemrograman perhitungan nilai faktorial, permutasi, kombinasi serta barisan dan deret Fibonacci dengan inputan bilangan asli menggunakan struktur *for*.

A. Pemrograman Faktorial

Membangun algoritma komputasi untuk mensimulasikan definisi faktorial dalam pembelajaran matematika dasar.

Algoritma Program:

Step 1: Masukkan nilai n

Step 2: Untuk $i = (n - 1), (n - 2), \dots, 3, 2, 1$

Step 3: Hitung nilai $n = n \times i$

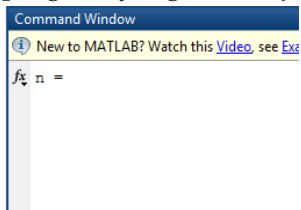
Step 4: Akhiri step 2

Step 5: Cetak nilai n

Bersesuaian dengan step di atas, berikut bahasa MATLAB yang dapat dibangun:

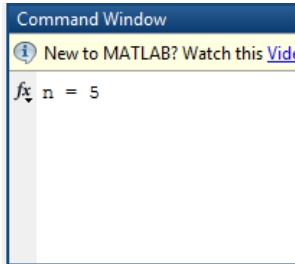
```
clear all
clc
close all
n=input('n = ');
for i=n-1:-1:1
    n=n*i
end
disp(['n! = ', num2str(n)])
```

Untuk menjalankan program tersebut, pada menu file, pilih *Debug* → *Save and Run*. Selanjutnya simpan dengan nama faktorial pada folder kerja anda. Setelah itu, anda menuju Command Window untuk memberikan inputan dari program yang telah dijalankan tersebut.



Setelah muncul permintaan inputan pada Command Window di atas, anda kemudian memasukkan bilangan yang

hendak dicari nilai faktorialnya, misalnya akan dihitung nilai dari $5!$, maka inputan $n = 5$ diberikan dan diperoleh hasil sebagai berikut:



Setelah itu kemudian tekan **Enter** dan akan diperoleh hasil sebagai berikut.

```
n = 5
n =
    20

n =
    60
n =
   120
n =
   120
n! = 120
```

Mula-mula n bernilai 5, kemudian n diganti dengan n yang baru dengan nilai dari hasil perkalian $5 \times 4 = 20$, selanjutnya $n = 20$ diganti dengan n yang baru yang diperoleh dari hasil kali antara $20 \times 3 = 60$. Begitu seterusnya hingga nilai terakhir $n = 120 \times 1 = 120$. Jika proses perhitungan tidak ingin ditampilkan, maka pada ujung step ke-7 anda akhiri dengan titik koma (;) maka akan diperoleh hasil eksekusi sebagai berikut:

```
n = 5
n! = 120
```

Program faktorial tersebut masih belum memenuhi definisi, karena n bukan bilangan asli, komputer akan memberikan

hasil perhitungan sesuai algoritma tersebut, sementara apapun hasilnya tentunya tidak benar. Hal ini disebabkan karena $n!$ terdefinisi untuk n bilangan asli dan $0! = 1$.

Berikut diberikan ilustrasi bentuk kesalahannya dari program sebelumnya

```
n = 5.5
n! = 324.8438
n = -6
n! = -6
n = 0
n! = 0
```

Oleh karena itu perlu dilakukan penyempurnaan program dengan memberikan kontrol untuk n dengan ketentuan bahwa n harus bilangan bulat positif dan $0! = 1$ sebagai berikut:

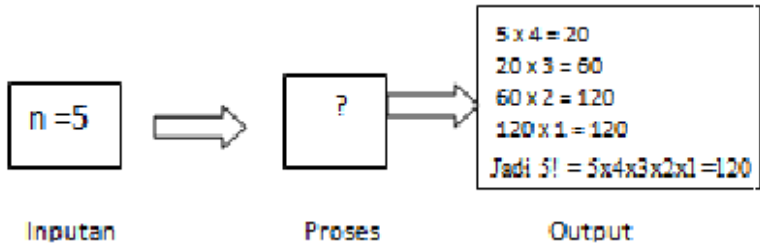
```
clear all
clc
close all
n=input('n = ');
if n>0&round(n)==n
    for i=n-1:-1:1
        n=n*i;
    end
    disp(['n! = ',num2str(n)])
elseif n==0
    disp('n! = 1')
else
    disp('Maaf tidak terdefinisi')
end
```

Hasil eksekusi dari program tersebut adalah sebagai berikut:

```
n = 0
n! = 1
n = 5
n! = 120
n = -5
Maaf tidak terdefinisi
n = 5.5
Maaf tidak terdefinisi
```

Dari eksekusi program tersebut, terlihat bahwa *output* komputasi yang diberikan telah sesuai dengan definisi

faktorial. Penyempurnaan program lebih lanjut yang harus dilakukan adalah bagaimana agar *output* dapat memberikan simulasi hasil perhitungan. Bentuk simulasi yang dapat didesain adalah sebagai berikut.



Gambar 6.1 Desain Sistem Program Simulasi Definisi Faktorial

Bentuk komputasi yang dapat dibangun agar dapat menghasilkan *output* tersebut berdasarkan inputan yang diberikan adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
disp('-----')
disp('Program: Simulasi Definisi Faktorial')
disp('-----')
n=input('n = ');
if n>0&round(n)==n
    t=['Jadi ', num2str(n), '! = ', num2str(n)];
    for i=n-1:-1:1
        h=['x', num2str(i)];
        t=[t h];
        s=n;
        n=n*i;
        disp([num2str(s), 'x', num2str(i), ' = ', ...
            num2str(n)])
    end
    disp([t ' = ', num2str(n)])
elseif n==0
    disp('0! = 1')
else
    disp('Maaf tidak terdefinisi')
```

end

Output eksekusi program tersebut adalah sebagai berikut:

```
-----  
Program: Simulasi Definisi Faktorial  
-----
```

```
n = 5  
5x4 = 20  
20x3 = 60  
60x2 = 120  
120x1 = 120  
Jadi 5! = 5x4x3x2x1 = 120
```

Dengan demikian program tersebut dapat digunakan untuk simulasi dalam pembahasan faktorial.

B. Pemrograman Simulasi Limit Fungsi

Pada kegiatan ini akan didiskusikan tentang bagaimana membuat simulasi pengertian secara intuitif limit kanan suatu fungsi.

Teori:

$\lim_{x \rightarrow c^+} f(x) = L$ berarti bahwa, apabila x mendekati c dari

kanan, maka $f(x)$ mendekati L .

Algoritma Program:

Step 1. Definisikan fungsi $f(x)$

Step 2. Inputkan nilai c

Step 3. Buat domain fungsi d

Step 4. Gambar grafik fungsi $f(x)$

Step 5. Mulai dari batas atas domain, sampai batas bawah domain

Step 6. Gambar titik domain dan titik $f(x)$

Step 7. Berikan jeda

Step 8. Akhiri loop step 5

Step 9. Tuliskan nilai limit

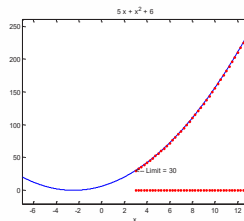
Algoritma Komputasi Limit Kanan Fungsi:

```
clear all
clc
close all
syms x
f=input('f(x) = ');
c=input('c = ');
d=c-10:0.25:c+10;
ezplot(f,d)
d=c+10:-0.25:c;
n=length(d);
fprintf('%5s %10s \n','x','f(x)')
for i=1:n
    hold on
    plot(d(i),0,'.r')
    hold on
    plot(d(i),subs(f,d(i)),'.r')
    pause(0.2)
    fprintf('%8.2f %8.2f \n',d(i),subs(f,d(i)))
end
L=double(limit(f,c));
text(c,subs(f,c),['<-- Limit = ',...
    num2str(L)])
```

Output dari eksekusi program tersebut adalah

```
f(x) = x^2+5*x+6
c      = 3
      x      f(x)
13.00    240.00
12.75    232.31
12.50    224.75
12.25    217.31
12.00    210.00
11.75    202.81
11.50    195.75
11.25    188.81
11.00    182.00
10.75    175.31
10.50    168.75
10.25    162.31
10.00    156.00
 9.75    149.81
 9.50    143.75
 9.25    137.81
 9.00    132.00
 8.75    126.31
```

8.50	120.75
8.25	115.31
8.00	110.00
7.75	104.81
7.50	99.75
7.25	94.81
7.00	90.00
6.75	85.31
6.50	80.75
6.25	76.31
6.00	72.00
5.75	67.81
5.50	63.75
5.25	59.81
5.00	56.00
4.75	52.31
4.50	48.75
4.25	45.31
4.00	42.00
3.75	38.81
3.50	35.75
3.25	32.81
3.00	30.00



Gambar 6.2 *Output* Simulasi Definisi Limit Kanan Fungsi

Latihan

1. Buatlah algoritma program dalam bahasa MATLAB untuk membentuk dan menghitung.
 - a. Barisan dan deret aritmatika,
 - b. Barisan dan deret geomteri, dan
 - c. Barisan dan deret Fibonacci.
2. Buatlah program untuk mensimulasikan garis singgung pada kurva.

3. Tuliskan *output* dari program berikut, kemudian jelaskan konsep matematikanya dan arti setiap perintahnya.

```
clear all
clc
close all
A=[1 2 3;5 6 4;5 4 3];
B=[3 4;9 6;3 6];
[b1,k1]=size(A);
[b2,k2]=size(B);
C=zeros(b1,k2);
for i=1:b1
    for j=1:k2
        for k=1:b1
            C(i,j)=C(i,j)+A(i,k).*B(k,j);
        end
    end
end
C
```


PEMROGRAMAN DENGAN STRUKTUR *WHILE-END* PADA *M-FILE* MATLAB

Struktur *while* merupakan perintah pengulangan dengan parameter berhenti pengulangan berdasarkan suatu kriteria logika, tidak berdasarkan banyaknya kali pengulangan sebagaimana pada struktur *for*. Berikut diberikan contoh aplikasinya pada program simulasi pengurangan bilangan bulat dan algoritma Eucliden.

A. Pemrograman Komputasi untuk Mensimulasikan Definisi Pembagian

Definisi pembagian:

Pembagian adalah pengurangan berulang hingga menghasilkan sisa 0 atau kurang dari pembagi.

10:2 artinya bahwa beberapa kali kita melakukan proses pengurangan bilangan 10 oleh 2 hingga sisanya 0 atau kurang dari 2. Solusi dari permasalahan ini adalah sebagai berikut:

Proses ke-1 $\rightarrow 10 - 2 = 8$

Proses ke-2 $\rightarrow 8 - 2 = 6$

Proses ke-3 $\rightarrow 6 - 2 = 4$

Proses ke-4 $\rightarrow 4 - 2 = 2$

Proses ke-5 $\rightarrow 2 - 2 = 0$

Jadi terjadi 5 kali proses,

Untuk membangun algoritma komputasinya, mula-mula dikonstruksi dengan algoritma dasarnya sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
a=input('a = ');
```

```

b=input('b = ');
while b>=a
    b=b-a
end

```

Program tersebut, mula-mula diawali dengan input bilangan bulat a dan b dengan ketentuan $b > a$. Kemudian dilakukan pemeriksaan kondisi oleh perintah `while`. Perintah `while b > a` dalam bahasa sehari-hari adalah, “ulangi terus perintah $b = b - a$ jika $b > a$ ”. Jika diberikan nilai $a = 2$ dan $b = 10$, maka komputer akan berkerja sebagai berikut.

```

a = 2
b = 10
b =
    8
b =
    6
b =
    4
b =
    2
b =
    0

```

Mula-mula $b = 10$, kemudian diganti dengan nilai b yang baru yakni $b = 8$ yang diperoleh dari perhitungan $b = 10 - 2 = 8$. Karena nilai $b = 10 - 2 = 8 > 2 = a$, maka proses penentuan b baru = b lama - a terus dikerjakan hingga diperoleh nilai $b > a$. Kondisi ini dicapai setelah proses dilakukan hingga 5 kali perulangan. Banyaknya pengulangan ini merupakan nilai dari pembagian sebagaimana definisinya. Untuk mengetahui nilai tersebut, perlu dibuatkan variabel akumulator yang mencatat proses pengulangan. Misalkan variabel tersebut adalah c , maka kita perlu mendefinisikan $c = 0$ sebelum proses perintah `while` dan menambahkan setiap kali proses `while` dengan $c = c + 1$ yang berarti proses pencatatan tiap kali

proses pengurangan. Bentuk penyempurnaan programnya adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
a=input('a = ');
b=input('b = ');
c=0;
while b>=a
    c=c+1
    b=b-a
end
```

Output dari eksekusi program tersebut adalah sebagai berikut:

```
a = 2
b = 10
c =
    1
b =
    8
c =
    2
b =
    6
c =
    3
b =
    4
c =
    4
b =
    2
c =
    5
b =
    0
```

Terlihat bahwa, nilai c yang terakhir adalah $c = 5$ yang berarti bahwa proses dilaksanakan hingga 5 kali. Hal ini berarti bahwa $10:2 = 5$. Agar *output* komputasi memperlihatkan proses pengurangan secara baik sehingga definisi pembagian tersebut menjadi jelas, maka perlu dikembangkan

penyempurnaan program, bentuk penyempurnaan yang dapat diberikan sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all

disp('Program : Simulasi Definisi Pembagian')
disp('-----')
a=input('a = ');
b=input('b = ');
if a==round(a) & b==round(b) & b>a
    s=b;
    c=0;
    while b>=a
        c=c+1;
        t=b;
        b=b-a;
        disp(['Proses ke-', num2str(c), '---->', num2str(t), '
- ', ...
            num2str(a), ' = ', num2str(b)])
    end
    disp(['Jadi ', num2str(s), ':', num2str(a), ' =
', num2str(c), ...
        ' dengan sisa ', num2str(b)])
else
    disp('Maaf, tidak diprogramkan')
end
```

Jika program tersebut dieksekusi, maka diperoleh sebagai berikut:

```
Program : Simulasi Definisi Pembagian
-----
a = 2
b = 10
Proses ke-1---->10 - 2 = 8
Proses ke-2---->8 - 2 = 6
Proses ke-3---->6 - 2 = 4
Proses ke-4---->4 - 2 = 2
Proses ke-5---->2 - 2 = 0
Jadi 10:2 = 5 dengan sisa 0
```

B. Pemrograman Komputasi untuk Mensimulasikan Definisi Algoritma Euclidean

Misalkan dimiliki bilangan bulat a dan b dengan $b > a$, maka akan terdapat bilangan x sehingga $b = ax + r$ dengan r adalah sisa. Jika dilakukan proses pengulangan dengan ketentuan $b = a$ dan $a = r$, maka akan terdapat nilai $r = 0$ sehingga FPB dari a dan b adalah a terakhir. Sebagai contoh adalah berikut ini untuk kasus $a = 12$ dan $b = 80$.

$$a = 12$$

$$b = 80$$

$$80 = (6)(12) + 8$$

$$12 = (1)(8) + 4$$

$$8 = (2)(4) + 0$$

$$\text{Jadi, FPB}(12,80) = 4$$

Ada bentuk $80 = (6)(12) + 8$, 80 adalah bilangan yang dibagi (b), 12 adalah bilangan pembagi 12, 6 adalah hasil bagi (x) dan 8 adalah sisa hasil bagi (r). Algoritma program yang diperoleh sebagai berikut:

Algoritma Dasar Euclidean

Step 1. Definisikan bilangan bulat a dan b dengan $b > a$

Step 2. Kerjakan step berikutnya, jika sisa hasil bagi tidak bernilai 0

Step 3. Hitung sisa hasil bagi, tulis sebagai r

Step 4. Tukarkan nilai b dengan a ($b = a$)

Step 5. Tukarkan nilai a dengan r ($a = r$)

Step 6. Akhiri program

Konversi algoritma program tersebut menjadi algoritma komputasi berbasis MATLAB adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
a=input('a = ');
```

```

b=input('b = ');
while mod(b,a)~=0
    r=mod(b,a)
    b=a
    a=r
end

```

Output dari eksekusi program tersebut adalah sebagai berikut:

```

a = 12
b = 80
r =
     8
b =
    12
a =
     8
r =
     4
b =
     8
a =
     4

```

Dari *output* program tersebut, mula-mula $a = 12$ dan $b = 80$. Kemudian ditentukan sisa hasil bagi 80 dan 12 dengan perintah $\text{mod}(b,a)$ dengan nilai sisanya adalah 8 yang ditulis dalam variabel r . Kemudian $r \neq 0$, maka dilakukan pertukaran yakni, $b = a = 12$ dan $a = r = 8$. Kemudian lagi menentukan sisa hasil bagi dan proses pertukaran nilai $b = a$ dan $a = r$. Proses ini berulang terus hingga sisa hasil bagi b oleh a yang terakhir yakni $r = 0$. Kondisi ini tercapai saat nilai b terakhir = 8 dan a terakhir = 4 dimana kita ketahui bahwa sisa hasil bagi 8 dan 4 adalah 0. Sebagaimana teorema Euclidean, maka kita peroleh nilai FPB dari $a = 12$ dan $b = 80$ adalah a terakhir = 4. Agar *output* simulasi yang diberikan dapat menyajikan proses yang lebih nyata, misalnya dengan *output* sebagai berikut

Program: Simulasi Teorema Euclidean

```

-----
a = 12
b = 80
80 = (6) (12) + 8
12 = (1) (8) + 4
8 = (2) (4) + 0
Jadi FPB(12,80) = 4

```

Konstruksi algoritma komputasi yang dapat diterapkan adalah sebagai berikut:

```

clear all
clc
close all
disp('Program: Simulasi Teorema Euclidean')
disp('-----')
a=input('a = ');
b=input('b = ');
t=[a b];
while a~=0
    r=mod(b,a);
    h=(b-r)/a;
    disp([num2str(b), ' = ', '(' , num2str(h), ') (' , ...
        num2str(a), ') + ' , num2str(r) ])
    b=a;a=r;
end
disp(['Jadi FPB(' , num2str(t(1)), ', ' , ...
    num2str(t(2)), ') = ' , num2str(b)])

```

Latihan

Kerjakan soal di bawah ini dengan benar

1. Pada program Euclidean tersebut di atas akan memberikan *output* yang bernilai salah manakala diberikan inputan $b < a$ dan $a \notin B^+$ dan $b \notin B^+$. Oleh karena itu sempurnakanlah program tersebut hingga memberikan *output* yang sesuai dengan definisi teorema Euclidean tersebut.
2. Dimiliki matriks sebagai berikut:

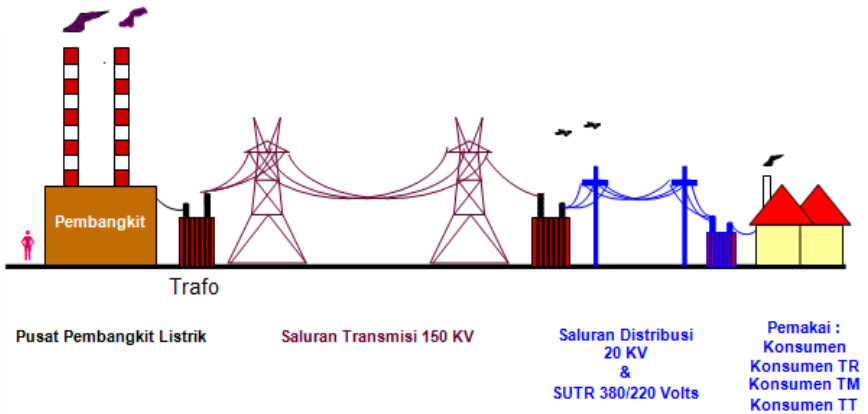
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 5 & 5 & 30 \\ 0 & 4 & 6 & 0 & 25 \\ 3 & 0 & 0 & 3 & 34 \\ 4 & 6 & 0 & 5 & 12 \end{bmatrix}$$

Buatlah suatu program dengan kombinasi struktur *for*, *if* dan *while* untuk membentuk agar elemen pivot matriks *A* tersebut tidak bernilai 0 dengan cara jika elemen pivotnya bernilai 0, maka elemen di baris bawahnya pada kolom pivot tersebut yang bernilai tidak nol, kemudian tukarkan baris tersebut dengan baris pivotnya.

BAB VII

GAMBARAN UMUM SISTEM TENAGA LISTRIK

A. Sistem Tenaga Listrik



Gambar 7.1 Diagram Sistem Tenaga Listrik Sederhana

1. Definisi, suatu sistem penyaluran tenaga listrik yang terdiri dari tiga komponen utama: pembangkitan (penggerak mula dan generator), penyaluran (jaringan transmisi dan distribusi) dan beban konsumen.
2. Tujuan, adapun dari penyelenggaraan sistem tenaga listrik adalah membangkitkan energi listrik kemudian menyalurkannya ke konsumen dengan aman efisien dan ekonomis.

B. Analisa Sistem Tenaga Listrik

1. Definisi, analisis sistem tenaga listrik adalah: serangkaian pengkajian terhadap proses penyediaan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator, penyaluran oleh saluran transmisi ke saluran distribusi sampai ke beban pada gardu

- distribusi, adakalanya hanya sampai pada gardu yang ke distribusi.
2. Tujuan; untuk merancang suatu sistem *supply* untuk sistem yang baru dan mengkaji sistem yang telah ada untuk penyelenggaraan yang handal, aman ekonomis untuk kondisi kerja rutin atau rencana pengembangan sesuai dengan perubahan beban (*demand target*).
 3. Manfaat
 - a. Mengetahui kebutuhan beban dari konsumen.
 - b. Dapat merencanakan kapasitas dari pembangkitan energi listrik.
 - c. Merencanakan sistem penyaluran (jaringan) energi listrik.
 - d. Merencanakan penjatahan (*dispatching*) *supply* aliran daya pada sistem penyaluran dari beberapa pembangkit ke setiap beban yang terpisah pada beberapa lokasi tertentu.
 - e. Merencanakan dan mengkaji keandalan sistem meliputi masalah keamanan, kestabilan dan dinamika beban.
 - f. Dapat membuat perencanaan untuk penyelenggaraan penyaluran energi listrik yang ekonomis.

C. Model Sistem Tenaga Listrik

1. Definisi, sistem tenaga listrik bentuk fisiknya direpresentasikan dalam suatu rangkaian yang disebut rangkaian satu garis (*one line diagram*) yang menggambarkan konfigurasi dari topologi jaringan listrik sistem pembangkit, penyaluran dan beban. Ini menunjukkan koneksitas antar masing-masing komponen sistem. Disamping itu dapat diperlihatkan dengan rangkaian ekuivalen sistem yang menampilkan konfigurasi dari parameter masing-masing komponen sistem serta kapasitasnya.

2. Manfaat

- a. Memperlihatkan konfigurasi sistem secara listrik untuk dapat menganalisis sistem tenaga listrik.
- b. Membantu dalam menampilkan hasil analisis dengan mencantumkan parameter dan variabel sistem serta keterangan lainnya yang dibutuhkan.

3. Diketahui

- a. Kondisi fisik topologi jaringan.
- b. Jenis dan kapasitas komponen sistem.

D. Sistem Per-Unit

1. Definisi

Suatu sistem perhitungan/komputasi yang menyederhanakan kapasitas, parameter, dan variabel sistem tenaga listrik ke dalam bentuk perbandingan antara nilai-nilai aktual dari masing-masing peralatan (komponen) dengan suatu nilai dari komponen atau peralatan yang dianggap sebagai dasar. Nilai dasar yang digunakan adalah kapasitas (daya) dari salah satu peralatan dan tegangan dari suatu sistem jaringan yang dianggap sesuai untuk dipakai. Dari nilai aktual dasar ini kemudian nilai-nilai aktual komponen yang lainnya dibandingkan terhadapnya menurut besaran (satuan) yang sama sehingga diperoleh rasio dari peralatan yang lain dengan peralatan yang dianggap dasar mempunyai nilai satu. Dari nilai rasio (per unit) atau besaran dasar (daya dan tegangan) diperoleh nilai per unit atau nilai dasar turunan untuk besaran-besaran fisik yang lainnya dengan menggunakan hukum-hukum fisika yang berlaku.

2. Manfaat

- a. Menghindari komputasi yang rumit pada nilai numerik yang besar.

- b. Pada transformator nilai per unit untuk sisi primer dan sekunder adalah sama sehingga mempermudah komputasi.
 - c. Setelah selesai komputasi nilai-nilai per unit dapat diubah kembali menjadi nilai-nilai aktual dari masing-masing komponen sistem.
3. Diketahui
- a. Nilai komponen sistem yang dianggap dasar berupa daya dan tegangan.
 - b. Konfigurasi sistem untuk keperluan transformasi nilai.
 - c. Nilai aktual atau nilai prosentasi dari masing-masing komponen yang ada dalam sistem yang akan ditinjau.
4. Dicari
- Nilai per unit parameter dan kapasitas dari peralatan/komponen sistem serta variabel dasar sistem.
5. Metode
- Nilai dasar peralatan = Nilai aktual peralatan/Nilai dasar peralatan

E. Matriks Jaringan

1. Definisi, kumpulan dari impedansi atau admitansi sistem yang disusun berdasarkan konfigurasi sistem dengan mengikuti pola hukum Kirchoff sehingga membentuk suatu matriks. Elemen diagonal matriks merupakan impedansi sendiri bus atau disebut impedansi titik penggerak (*driving point impedance*) sedangkan impedansi lainnya merupakan impedansi bersama antara bus yang terhubung pada impedansi tersebut atau disebut impedansi transien (*transfer impedance*).

2. Manfaat

- a. Merepresentasikan komposisi impedansi/admitansi jaringan secara sistematis dalam bentuk matriks untuk suatu sistem yang besar (kompleks).
 - b. Dari komposisi yang sistematis ini dapat dipakai untuk menghitung secara serentak arus atau tegangan pada masing-masing bus.
 - c. Dengan membentuk persamaan jaringan dalam bentuk matriks maka perhitungan/komputasi jaringan dapat dilaksanakan dengan bantuan komputer.
3. Diketahui, yang harus diketahui adalah parameter jaringan dan konfigurasi jaringan
 4. Dicari, sedangkan yang dicari yaitu: komposisi elemen-elemen pada matriks jaringan yaitu elemen diagonal komponen penggerak, dan komponen transien.
 5. Model, menggunakan hukum Kirchoff arus.

F. Analisis Aliran Daya

1. Definisi

Analisis aliran daya merupakan pengkajian terhadap daya yang ada pada setiap bus sehingga diketahui apakah bus tersebut memberikan daya atau menerima daya. Dengan demikian analisis aliran daya mencari besar dan arah daya pada jaringan (bus).

2. Manfaat

- a. Untuk mengetahui permintaan dan pembangkitan.
 - b. Mencari kehandalan sistem dan stabilitas.
 - c. Rencana pengembangan.
 - d. Menentukan operasi ekonomis sistem.
3. Diketahui: konfigurasi jaringan, parameter jaringan, serta kebutuhan beban.

4. Dicari
 - a. Daya masing-masing bus.
 - b. Arah aliran daya masing-masing bus.
5. Metode yang digunakan yaitu: Gauss-Seidel, Past Decouple dan Newton-Raphson

G. Analisis Gangguan

1. Definisi
Studi yang dilakukan untuk mengetahui gangguan yang terjadi pada sistem.
2. Manfaat
 - a. Menentukan titik gangguan.
 - b. Menentukan koordinasi dan rating perangkat pengaman.
3. Diketahui, Parameter peralatan/jaringan.
4. Dicari
 - a. Besar arus gangguan.
 - b. Lokasi gangguan.
5. Model yang digunakan: Hukum Kirchoff & Hukum Ohm

Latihan

1. Bagaimana definisi dan manfaat dari matriks jaringan dalam konteks analisis sistem tenaga listrik?
2. Apa yang dimaksud dengan analisis aliran daya sistem tenaga listrik? Jelaskan beberapa manfaat dari analisis aliran daya.
3. Sebutkan dan jelaskan metode-metode yang digunakan dalam analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik.
4. Apa yang dimaksud dengan analisis gangguan dalam analisis sistem tenaga listrik? Jelaskan manfaat dari analisis gangguan.

BAB VIII ANALISA SISTEM TENAGA

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem penyaluran tenaga listrik yang terdiri dari 3 komponen utama yaitu **Pembangkitan (penggerak mula dan generator)**, **Penyaluran (jaringan transmisi dan distribusi)** dan **Beban (konsumen)** yang bertujuan membangkitkan energi listrik kemudian menyalurkan ke konsumen dengan aman, efisien, dan ekonomis. Adapun analisa sistem tenaga listrik adalah serangkaian pengkajian terhadap proses penyediaan tenaga listrik yang dibangkitkan oleh generator, penyaluran oleh saluran transmisi ke saluran distribusi sampai ke beban pada gardu distribusi sampai ke beban pada gardu distribusi, tetapi adakalanya hanya sampai pada gardu yang ke distribusi.

Setiap bagian sistem tersebut terdiri atas beberapa komponen atau peralatan yang saling berhubungan. Suatu sistem pembangkit terdiri atas mesin serempak (generator sinkron), penguat (*exciter*), sistem pengatur tegangan (*voltage regulator*), sistem penggerak utama beserta mekanisme *governor*.

Sistem penyaluran dapat terdiri atas saluran transmisi, distribusi transformator, peralatan relai pengaman dan pemutus rangkaian, kapasitas statis, reaktor paralel. Sedangkan beban yang biasanya dalam penganalisaan tidak diberikan secara detail tetapi digambarkan sebagai suatu impedansi tetap yang menyerap daya dari sistem tenaga listrik.

Untuk menganalisis permasalahan, komponen-komponen suatu sistem tenaga listrik diberikan dalam bentuk rangkaian setaranya. Penggambaran ini bukan hanya untuk

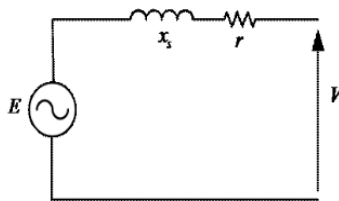
mempermudah perhitungan saja, tetapi digunakan juga di dalam praktek untuk mempermudah komunikasi.

Rangkaian setara yang digunakan untuk menggambarkan komponen-komponen sistem tenaga listrik adalah rangkaian setara satu fasa dengan nilai-nilai fasa ke netralnya. Dasar pemikiran dari gambaran ini adalah dengan menganggap bahwa sistem tiap fasa tersebut dalam keadaan seimbang pada kondisi operasi normal.

Jika terjadi keseimbangan pada fasa-fasanya akibat adanya gangguan pada sistem tersebut, maka seluruh pernyataan fasanya dituliskan dan untuk menyelesaikannya digunakan metode komponen simetris yang pembahasannya pada bab tersendiri.

A. Mesin Serempak

Terdapat 2 bentuk konstruksi rotor yang menghasilkan karakteristik yang sangat berpengaruh terhadap operasi suatu sistem, yaitu mesin serempak dengan rotor bulat (*round or cylindrical rotor*) dan mesin serempak dengan rotor kutub menonjol (*the salient pole rotor*). Diameter rotor bulat relatif lebih kecil dibandingkan dengan diameter rotor dengan kutub menonjol. Mesin serempak dengan rotor bulat dioperasikan pada putaran tinggi, dan dikenal sebagai turbo generator. Rangkaian setara mesin serempak diberikan sebagai suatu sumber tegangan dengan suatu impedansi yang dihubungkan seri dengan sumber tegangan tersebut.



Gambar 9.1 Rangkaian setara mesin serempak

Gambar 9.1 menunjukkan rangkaian setara suatu generator (mesin serempak). Pengaruh reaksi jangkar dan flusk bocor merupakan reaktansi sinkron. Tahanan setiap fasa dari belitan jangkar yang terhubung seri dengan reaktansi, dapat diabaikan terhadap reaktansinya. Rangkaian setara tersebut digunakan untuk menganalisis suatu sistem tenaga listrik hanya dalam keadaan tetap.

B. Saluran Transmisi

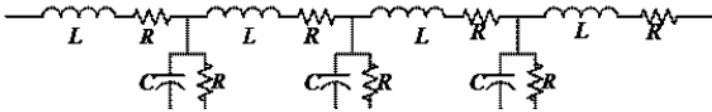
Persoalan yang terpenting di dalam suatu perencanaan dan operasi dari suatu sistem tenaga listrik adalah pemeliharaan tegangan dalam batas-batas yang telah ditentukan pada berbagai titik dalam sistem tersebut. Untuk itu, perlu diketahui besar tegangan, arus dan daya yang mengalir pada setiap titik sepanjang saluran transmisi.

Untuk merepresentasikan suatu saluran transmisi ke dalam bentuk rangkaian simulasinya, tergantung pada panjang dari saluran transmisi serta ketelitian yang diinginkan. Menurut panjangnya, saluran transmisi dapat digolongkan menjadi 3, yaitu:

1. Saluran transmisi pendek (*short line*), adalah saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km (50 mil).
2. Saluran transmisi menengah (*medium line*), adalah saluran transmisi yang panjangnya antara 80 km sampai dengan 240 km (50-150 mil).
3. Saluran transmisi panjang (*long line*), adalah saluran transmisi yang panjangnya lebih dari 240 km (lebih dari 150 mil).

Parameter-parameter saluran sangat berpengaruh terhadap tegangan bus dan aliran daya yang mengalir pada saluran tersebut. Nilai dari parameter-parameter saluran sangat tergantung pada panjangnya salurannya. Suatu saluran

transmisi mempunyai parameter-parameter saluran antara lain tahanan (resistansi), reaktansi serta konduktansi yang tersebar sepanjang saluran. Rangkaian setara untuk saluran transmisi secara umum dapat dilihat pada gambar 9.2.



Gambar 9.2 Rangkaian setara saluran transmisi

Untuk saluran pendek dan saluran menengah, parameter-parameter terpusat (*lumped*) tidak tersebar secara merata sepanjang saluran. Hal ini tidak menimbulkan perbedaan, apakah parameter-parameter itu terpusat atau tersebar sepanjang saluran, selama pengukuran dilakukan pada ujung-ujung saluran tersebut.

C. Transformator

Dalam bidang sistem tenaga listrik, pemakaian transformator dapat dikelompokkan menjadi transformator daya, transformator distribusi dan transformator pengukuran yang terdiri atas transformator arus dan transformator tegangan. Sedangkan menurut jumlah sisi belitnya dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

1. Transformator satu belitan.
2. Transformator dua belitan.
3. Transformator tiga belitan.

D. Beban

Di dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, beban tidak diberikan secara lengkap. Untuk merepresentasikan suatu beban dari suatu sistem tenaga listrik ($P-jQ$), sangat penting untuk mengetahui variasi daya aktif (P) dan daya

reaktif (Q) terhadap variasi tegangannya. Pada suatu bus, suatu beban mungkin terdiri atas:

1. Motor-motor induksi: 50 - 70%.
2. Motor-motor sinkron: 20 - 30%.
3. Penerangan dan pemanasan: 5 - 10%.

Di dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, terdapat 3 cara untuk merepresentasikan suatu beban, antara lain:

1. Representasi beban dengan daya tetap. Dalam hal ini daya aktif P (MW), maupun daya reaktif Q (MVAR) dianggap konstan. Representasi beban ini digunakan untuk merepresentasikan beban untuk studi aliran daya.
2. Representasi beban dengan arus tetap. Dalam hal ini arus dihitung sebagai:

$$I = \frac{P - jQ}{V} = I \angle (\theta - \phi) \dots (9.1)$$

Dimana:

$$V = V \angle \theta$$

$\phi = \tan^{-1}(Q/P) =$ sudut daya (*power factor angle*).

Besar arus dijaga konstan.

3. Representasi beban dengan impedansi tetap. Untuk merepresentasikan suatu beban dengan impedansi tetap, daya yang diserap oleh beban dikonversikan ke dalam bentuk impedansi seri atau paralel. Representasi beban dengan impedansi tetap ini biasanya digunakan pada studi stabilitas suatu sistem tenaga listrik. Jika MW dan MVAR dari beban diketahui dan bernilai tetap, maka impedansi dihitung dengan:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V^2}{P - jQ} \quad \text{atau} \quad Y = \frac{I}{V} = \frac{P - jQ}{V^2} \dots (9.2)$$

Latihan

1. Buatlah kelompok berjumlah 5 orang.
2. Adapun masing-masing tugas dari setiap kelompok adalah sebagai berikut:
 - a. Kelompok 1 membahas tentang penguat (*exciter*) pada sistem pembangkitan.
 - b. Kelompok 2 membahas tentang transmisi saluran udara tegangan ekstra tinggi dan saluran transmisi udara tegangan tinggi
 - c. Kelompok 3 membahas tentang beban dalam sistem tenaga listrik
 - d. Kelompok 4 membahas tentang jenis-jenis trafo beserta sistem kerjanya.
 - e. Kelompok 5 membahas daya aktif dan daya reaktif serta segitiga daya.

REPRESENTASI SISTEM TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik bentuk fisiknya direpresentasikan dalam suatu rangkaian yang disebut rangkaian satu garis (*one line diagram*) yang menggambarkan konfigurasi dari topologi jaringan listrik sistem pembangkit, penyaluran dan beban. Ini menunjukkan koneksitas antar masing-masing komponen sistem. Di samping itu dapat diperlihatkan dengan rangkaian ekuivalen sistem yang menampilkan konfigurasi dari parameter masing-masing komponen sistem serta kapasitasnya.

A. Diagram Satu Garis Saluran

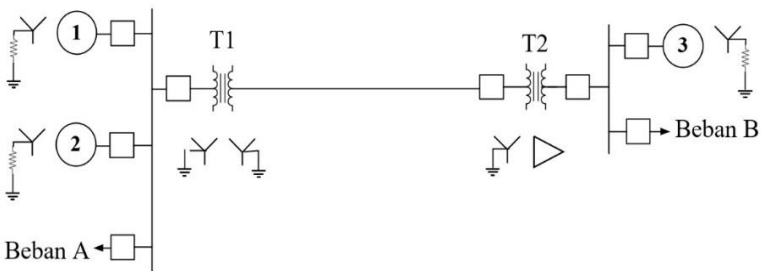
Dengan menganggap bahwa sistem tiga fasa dalam keadaan seimbang, penyelesaian rangkaian dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian fasa tunggal dengan jalur netral sebagai jalur balik. Seringkali, diagram semacam itu disederhanakan dengan mengabaikan jalur netralnya dan menunjukkan bagian-bagian komponen dengan lambang standar sebagai pengganti rangkaian-rangkaian setaranya. Diagram sistem tenaga listrik yang sederhana ini disebut diagram satu saluran (*one line diagram*).

Pembuatan diagram satu aliran ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran ringkas dari suatu sistem tenaga listrik. Lambang peralatan yang biasa digunakan untuk membuat diagram satu saluran dapat dilihat pada standar yang berlaku.

Keterangan mengenai beberapa sifat penting dari suatu sistem berbeda, tergantung pada masalah yang akan ditinjau

sesuai dengan maksud diagram itu dibuat. Misalnya, lokasi dari pemutus rangkaian dan *relay* tidak penting apabila diagram tersebut digunakan untuk studi aliran daya. Namun, keterangan tentang pemutus rangkaian dan *relay* akan menjadi sangat penting untuk studi kestabilan suatu sistem tenaga listrik dalam keadaan peralihan karena adanya gangguan.

Untuk menghitung besarnya arus yang mengalir pada saat terjadinya gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan pada sistem tiga fasa, harus diketahui letak titik-titik di mana sistem tersebut dihubungkan dengan tanah. Pada umumnya, titik netral transformator pada sistem transmisi selalu ditanahkan secara langsung (*solidly grounded*). Gambar 9.1 menunjukkan contoh diagram segaris suatu sistem tenaga listrik yang sederhana.



Gambar 9.1 Diagram Segaris Suatu Sistem Tenaga Listrik

Untuk mengetahui perilaku suatu sistem tenaga listrik dalam keadaan berbeban atau saat terjadi gangguan, diagram satu saluran terlebih dahulu diubah menjadi diagram

impedansi yang menunjukkan setara dari setiap komponen sistem tersebut dengan berpedoman pada salah satu sisi yang sama pada transformator.

B. Daya Listrik

Daya listrik dalam bentuk kompleks dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$S = P + jQ \quad (9.1)$$

Di mana:

- S = $V.I^*$ adalah daya listrik
- P = $V.I \cos\phi$: daya aktif/nyata (watt)
- Q = $V.I \sin\phi$: daya reaktif/semu (VAR)
- $V.I$ = Harga efektif dan tegangan arus
- ϕ = Sudut fasa (I terbelakang terhadap V)
- $\cos\phi$ = Faktor daya (*power factor*)

Jadi:

$$\begin{aligned} S &= VI \cos\phi + jVI \sin\phi \\ &= VI(\cos\phi + j \sin\phi) \end{aligned}$$

Atau:

$$S = V.I \angle \phi$$

Karena konjugate dari I adalah:

$$I^* = I \angle -\phi$$

Maka jelaslah bahwa daya listrik dalam bentuk kompleks dapat dinyatakan sebagai:

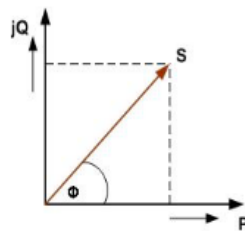
$$S = V.I^* \quad (9.2)$$

Atau:

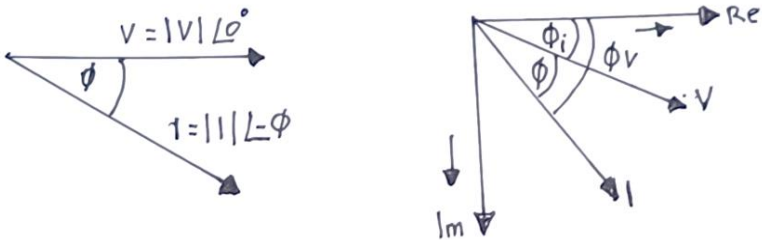
$$P + jQ = V.I^* \quad (9.3)$$

Karena $V = V\angle\Phi^0$, sedangkan harga mutlak dari S atau disebut Volt Ampere dapat diperoleh dari:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V.I \quad (9.4)$$



Gambar 9.2a Vektor Daya



Gambar 9.2b Vektor Tegangan dan Arus

Dengan memperhatikan gambar 9.2b, maka secara umum daya dapat ditentukan sebagai:

$$V = V.\cos\phi_V + jV.\sin\phi_V$$

$$I = I \cdot \cos \phi_i + jI \cdot \sin \phi_i$$

$$I^* = I \cdot \cos \phi_i - jI \cdot \sin \phi_i$$

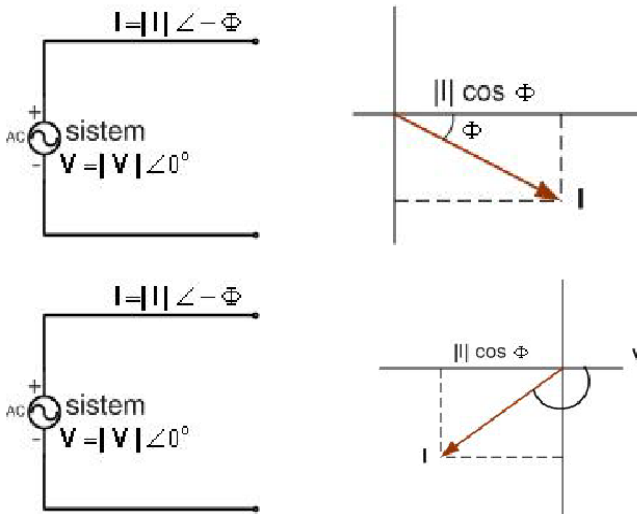
Jadi,

$$\begin{aligned} S &= V \cdot I^* \\ &= (V \cdot \cos \phi_v + jV \sin \phi_v)(I \cdot \cos \phi_i - jI \cdot \sin \phi_i) \end{aligned}$$

Karena $\Phi = (\phi_v - \phi_i)$, maka:

$$S = V \cdot I \cos \Phi + j V \cdot I \sin \Phi \quad (9.5)$$

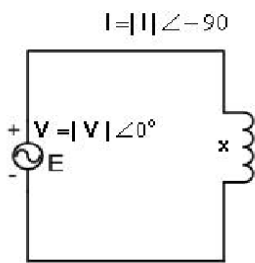
Daya reaktif mempunyai tanda positif bila arus I terbelakang (*lagging*) terhadap tegangan V . Sebaliknya bila arus I mendahului (*leading*) terhadap tegangan V , daya reaktif Q mempunyai tanda negatif. Hal ini sesuai dengan pemilihan tanda positif untuk daya reaktif pada rangkaian induktif dan tanda negatif untuk rangkaian kapasitif. Untuk menentukan arah aliran daya aktif, perhatikan gambar 9.3



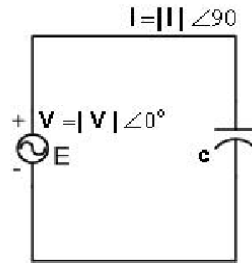
Gambar 9.3 Arah Aliran Daya Reaktif

Bila $I \cdot \cos \Phi$ sefasa dengan V , seperti terlihat pada gambar 9.3, berarti daya listrik dibangkitkan (sumber adalah generator) dan mengalir menuju sistem (arus keluar dari terminal menuju positif sumber). Dalam hal ini $P = \text{Re}(V.I)$ mempunyai tanda positif. Bila $I \cdot \cos \Phi$ mempunyai beda fasa 180° terhadap V , seperti terlihat pada gambar 10.3, berarti daya diserap (sumber adalah motor). Arus menuju ke terminal positif dari sumber seperti terlihat pada gambar. $P = \text{Re}(V.I^*)$ mempunyai tanda negatif dalam hal ini.

Untuk menentukan arah aliran daya reaktif, ditunjukkan pada gambar 10.4. Daya reaktif sebesar $I^2 X$ (dengan tanda positif) diberikan pada induktansi penyerap daya reaktif. Dalam hal ini arus I terbelakang (*lagging*) 90° terhadap tegangan V dan $Q = \text{Im}(V.I^*)$ mempunyai tanda positif.



Gambar a Induktif



Gambar b Kapasitif

Gambar 9.4 Rangkaian Daya Reaktif

Pada gambar 9.4 di atas, daya reaktif dengan tanda negatif diberikan pada kapasitor atau sumber menerima daya reaktif dari kapasitor. Dalam hal ini arus I mendahului (*leading*) 90° terhadap V dan $Q = \text{Im}(V.I^*)$ mempunyai tanda negatif. Di sini yang dimaksud adalah Re adalah bagian nyata (*real*) dan Im adalah bagian khayal (*imaginer*). Untuk suatu generator (sumber), maka:

- $P = +$: sumber memberi daya aktif
- $P = -$: sumber menyerap daya aktif
- $Q = +$: sumber memberikan daya reaktif
- $Q = -$: sumber menyerap daya reaktif

Sedangkan untuk beban motor, maka:

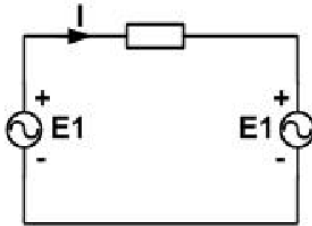
- $P = +$: sumber menyerap memberikan daya aktif
- $P = -$: sumber memberikan daya aktif
- $Q = +$: sumber menyerap memberikan daya reaktif
- $Q = -$: sumber memberikan daya reaktif

Sebagai ilustrasi, perhatikan contoh soal berikut ini:

Dua sumber tegangan ideal yang ditunjukkan pada gambar 9.5 menggambarkan dua buah mesin arus bolak-balik yang

dihubungkan seperti terlihat dalam gambar. Bila tegangan $E_1 = 100 \angle 0^\circ$, $E_2 = 100 \angle 30^\circ$ dan $Z = 0 + j5$ ohm, tentukan:

1. Untuk masing-masing mesin apakah mesin tersebut memberikan atau menerima daya reaktif dan berapa besarnya?
2. Untuk masing-masing mesin apakah mesin tersebut memberikan atau menerima daya reaktif dan berapa besarnya?
3. P dan Q yang diserap oleh impedansi Z ?



Gambar 9.5 Rangkaian

Berikut langkah-langkah untuk menyelesaikan masalah ini dengan menggunakan MATLAB:

```
clear all
clc
close all
% Definisikan nilai-nilai yang diberikan
E1=100*exp(1j*deg2rad(0)); % 100<0 derajat
E2=100*exp(1j*deg2rad(30)); % 100<30 derajat
Z=0+1j*5; % Impedansi 0+j5 ohm
% Hitung beda tegangan pada impedansi Z
VZ=E1-E2;
% Hitung arus I yang melewati Z
I=VZ/Z;
% Konjugat arus
Iconj=conj(I);
% Hitung daya kompleks S
```

```

S=VZ*Iconj;
% Ambil bagian real dan imajiner untuk daya aktif
% dan daya reaktif
P=real(S);
Q=imag(S);
% Tampilkan hasilnya
disp(['Beda tegangan (VZ) = ',num2str(VZ)])
disp(['Arus I           = ',num2str(I)])
disp(['Daya aktif (P)   : ',num2str(P), 'watt'])
disp(['Daya reaktif (Q) : ',num2str(Q), ' VAR'])
% Visualisasi
figure;
subplot(2,1,1)
hold on
quiver(0,0,real(E1),imag(E1),'r',...
       'LineWidth',1.5,'MaxHeadSize',0.5)
quiver(0,0,real(E2),imag(E2),'b',...
       'LineWidth',1.5,'MaxHeadSize',0.5)
quiver(0,0,real(VZ),imag(VZ),'g',...
       'LineWidth',1.5,'MaxHeadSize',0.5)
legend('E1','E2','VZ')
title('Fasor Tegangan')
xlabel('Real')
ylabel('Imajiner')
axis equal
grid on
hold off
subplot(2,1,2)
hold on;
quiver(0,0,real(I),imag(I),'k',...
       'LineWidth',1.5,'MaxHeadSize',0.5)
legend('I')
title('Fasor Arus')
xlabel('Real')
ylabel('Imajiner')
axis equal
grid on
hold off

```

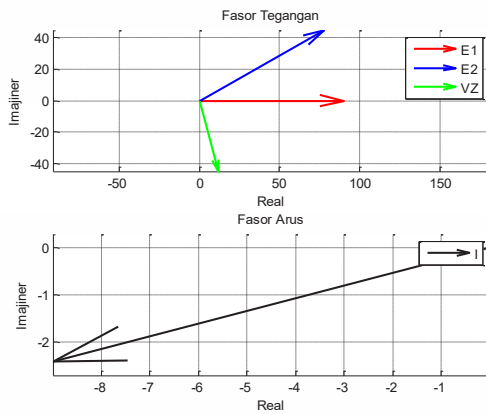
Penjelasan Kode

1. Definisi Nilai:

- Tegangan E_1 dan E_2 didefinisikan dalam bentuk eksponensial kompleks menggunakan fungsi \exp dan $\deg2rad$.
 - Impedansi Z juga didefinisikan sebagai bilangan kompleks.
2. Perhitungan Tegangan dan Arus:
 - Beda tegangan V_Z dihitung sebagai selisih antara E_1 dan E_2 .
 - Arus I dihitung sebagai V_Z dibagi dengan Z .
 3. Perhitungan Daya Kompleks:
 - Daya kompleks S dihitung sebagai hasil kali V_Z dan konjugat dari arus I .
 4. Tampilkan Hasil:
 - Hasil beda tegangan V_Z , arus I , daya aktif P , dan daya reaktif Q ditampilkan menggunakan fungsi `disp`.
 5. Visualisasi:
 - Fasor tegangan E_1 , E_2 , dan V_Z digambarkan pada subplot pertama menggunakan fungsi `quiver`.
 - Fasor arus I digambarkan pada subplot kedua.

Jika kode MATLAB di atas dijalankan, maka hasil yang didapatkan sebagai berikut:

```
Beda tegangan (VZ) = 13.3975-50i
Arus I              = -10-2.67949i
Daya aktif (P)     : 0 watt
Daya reaktif (Q)   : 535.8984 VAR
```



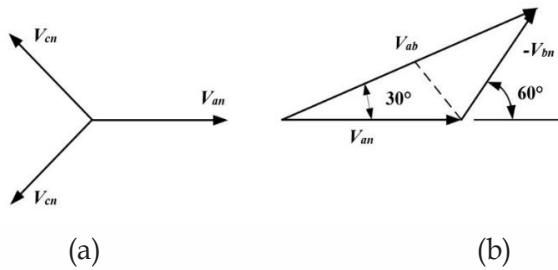
Gambar 9.6 Fasor Tegangan & Fasor Arus

C. Sistem Tiga Fasa

Pada sistem tenaga listrik tiga fasa, daya listrik yang dibangkitkan, disalurkan, dan didistribusikan semuanya menggunakan sistem yang seimbang. Sistem tegangan yang seimbang terdiri atas tegangan fasa tunggal yang memiliki magnitudo dan frekuensi yang sama, tetapi antara satu dengan lainnya memiliki beda fasa 120° . Tegangan ini dapat dihubungkan dalam konfigurasi bintang (Y) atau segitiga (Δ).

a. Hubungan bintang (Y)

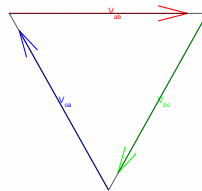
Pada hubungan bintang atau Y terdapat netral atau titik bintang. Tegangan antara dua terminal dari tiga terminal a, b dan c mempunyai besar magnitudo dan beda fasa yang berbeda dengan tegangan tiap terminal terhadap titik netral. Tegangan V_{ab} , V_{bc} , dan V_{ca} disebut tegangan saluran dan tegangan V_{an} , V_{bn} , dan V_{cn} , disebut tegangan fasa, seperti dilihat pada gambar 9.7.



Gambar 9.7 (a) Tegangan-tegangan terhadap netral; (b) Hubungan antara suatu tegangan saluran dan tegangan-tegangan ke netral

b. Hubungan delta (Δ)

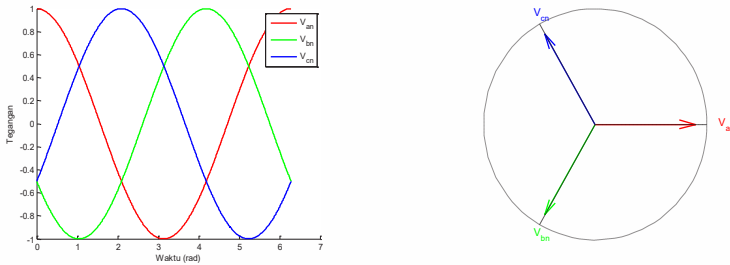
Hubungan ini diperoleh bila ketiga sumber satu fasa dihubungkan sedemikian rupa sehingga diperoleh hubungan delta fasa tiga. Pada hubungan ini, tegangan saluran dan tegangan fasa mempunyai besar magnitude yang sama: $V_l = V_f$. Namun demikian, arus saluran dan arus fasa tidak sama dan hubungan antara kedua arus tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan hukum Kirchoff untuk arus pada salah satu dari terminal saluran (titik a,b, dan c), seperti dilihat pada gambar 9.8.



Gambar 9.8 Metode alternatif untuk menggambar tegangan-tegangan seimbang

D. Daya pada Sistem Tiga Fasa

Pada sistem tenaga listrik 3 fase, idealnya daya listrik yang dibangkitkan, disalurkan dan diserap oleh beban semuanya seimbang, P pembangkitan = P pemakaian, dan juga pada tegangan yang seimbang. Pada tegangan yang seimbang terdiri dari tegangan 1 fase yang mempunyai magnitude dan frekuensi yang sama tetapi antara 1 fase dengan yang lainnya mempunyai beda fase sebesar 120° listrik, sedangkan secara fisik mempunyai perbedaan sebesar 60° , dan dapat dihubungkan secara bintang (Y, wye) atau segitiga (delta, Δ, D).



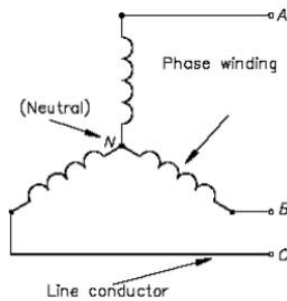
Gambar 9.9 Sistem Tiga Fasa

Gambar 9.9 menunjukkan diagram fasor dari tegangan fase. Jika fasor-fasor tegangan tersebut berputar dengan kecepatan sudut dan dengan arah berlawanan jarum jam (arah positif), maka nilai maksimum positif dari fase terjadi berturut-turut untuk fase V_1 , V_2 dan V_3 . Sistem tiga fase ini dikenal sebagai sistem yang mempunyai urutan fase $a-b-c$. Sistem tegangan tiga fase ini dibangkitkan oleh generator sinkron 3 fase.

1. Hubungan bintang (Y, wye)

Pada hubungan bintang (Y, wye), ujung-ujung tiap fase dihubungkan menjadi satu dan membentuk tidak netral atau

titik bintang. Tegangan antara dua dari tiga terminal $a - b - c$ memiliki besaran magnitudo dan beda fase yang berbeda dengan tegangan tiap terminal terhadap titik netral. Tegangan V_a , V_b dan V_c disebut sebagai tegangan fase atau V_f .



Gambar 9.10 Hubungan Bintang (Y , wye)

Dengan adanya saluran atau titik netral, besaran tegangan fase dihitung terhadap saluran atau titik netral tersebut, yang juga membentuk sistem tegangan 3 fase yang seimbang dengan magnitudonya (akar 3 dikali magnitudo dari tegangan fase).

$$V_{line} = \sqrt{3V_{fase}} = 1.73V_{fase}$$

$$(9.6)$$

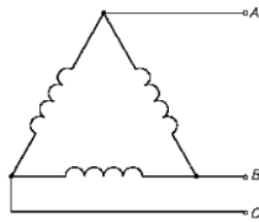
Sedangkan untuk arus yang mengalir pada semua fase mempunyai nilai yang sama,

$$I_{line} = I_{fase}$$

$$I_a = I_b = I_c$$

2. Hubungan segitiga

Pada hubungan segitiga (delta, Δ , D), ketiga fase saling dihubungkan sehingga membentuk hubungan setiga 3 fase.



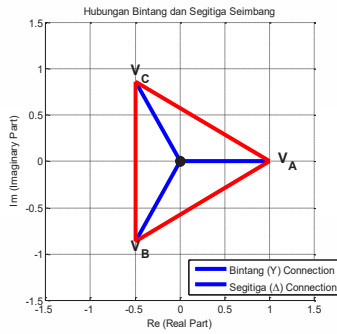
Gambar 9.11 Hubungan Segitiga (delta, Δ , D)

Dengan tidak adanya titik netral, besarnya tegangan saluran dihitung antar fase. Karena tegangan saluran dan tegangan fase mempunyai magnitudo yang sama, maka $V_{line} = V_{fase}$. Namun, arus saluran dan arus fase tidak sama, dan hubungan antara kedua arus tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan hukum Kirchoff. Sehingga:

$$I_{line} = \sqrt{3I_{fase}} = 1.73I_{fase} \quad (9.7)$$

3. Daya pada sistem tiga fasa

Pada beban yang seimbang, jumlah daya yang diberikan oleh suatu generator 3 fase atau daya yang diserap oleh beban 3 fase diperoleh dengan menjumlahkan daya dari tiap-tiap fase. Pada sistem yang seimbang, daya total tersebut sama dengan tiga kali daya fase, karena daya pada tiap-tiap fase adalah sama.



Gambar 9.12 Hubungan Bintang dan Segitiga Seimbang

Jika sudut antara arus dan tegangan adalah sebesar θ , maka besarnya daya per-fase adalah:

$$P_{fase} = V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos \theta \quad (9.8)$$

sedangkan besarnya total daya adalah penjumlahan dari besarnya tiap fase, dan dapat dituliskan dengan:

$$P_{total} = 3 \cdot V_f \cdot I_f \cdot \cos \theta \quad (9.9)$$

Pada hubungan bintang, karena besarnya tegangan saluran adalah $1,73 V_{fase}$ maka tegangan perfasanya menjadi $V_{fasa}/1,73$ dengan nilai arus saluran sama dengan arus fase, $I_L = I_{fase}$, maka daya total (P total) pada rangkaian hubungan bintang (γ) adalah

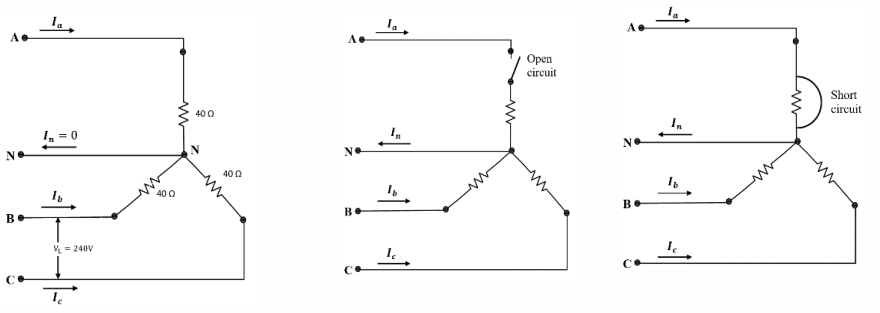
$$P_{total} = 3 V_L/1,73 I_L \cos \theta = 1,73 V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (9.10)$$

Dari persamaan total daya pada kedua jenis hubungan terlihat bahwa besarnya daya pada kedua jenis hubungan adalah sama, yang membedakan hanya pada tegangan kerja dan arus yang mengalirnya saja, dan berlaku pada kondisi beban yang seimbang.

Daya sistem 3 fase yang tidak seimbang ditentukan oleh sifat pembebanan yang seimbang, di mana jumlah phasor

tegangan dari ketiga fase adalah nol, begitu pula dengan jumlah phasor arus pada ketiga fase. Jika impedansi beban antar fase tidak sama, maka jumlah phasor arus netralnya (I_N) tidak akan nol, menandakan bahwa beban tidak seimbang. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh hubung singkat atau hubung terbuka pada beban.

Dalam sistem 3 fase, terdapat dua jenis ketidakseimbangan: ketidakseimbangan pada beban dan ketidakseimbangan pada sumber listrik. Mengatasi kedua jenis ketidakseimbangan ini secara bersamaan dapat menjadi sangat rumit, oleh karena itu, kita akan fokus pada penanganan ketidakseimbangan beban dengan sumber listrik yang seimbang.



(a) Balanced 3 - ϕ load, $I_N = 0$ (b) Unbalanced 3 - ϕ load, open circuit $I_N = I_B + I_C$ (c) Unbalanced 3 - ϕ load, short circuit $I_N = I_A$

Gambar 9.13 Ketidakseimbangan Beban pada Sistem 3 Fase

Pada saat terjadi gangguan, saluran netral pada hubungan bintang akan teraliri arus listrik. Ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fase dapat diketahui dengan indikasi naiknya

arus pada salah satu fase secara tidak wajar. Arus pada tiap fase memiliki perbedaan yang cukup signifikan, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan.

Latihan

1. Sebuah beban tiga fasa yang terhubung bintang memiliki tegangan saluran sebesar 380V dan arus saluran sebesar 10A dengan faktor daya 0,8 lagging. Hitung daya aktif total yang diserap oleh beban tersebut.
2. Jelaskan bagaimana ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa dapat menyebabkan arus netral. Berikan contoh situasi di mana hal ini bisa terjadi dan apa dampaknya pada peralatan listrik.
3. Jelaskan langkah-langkah untuk mengubah diagram satu saluran menjadi diagram impedansi. Mengapa perubahan ini penting dalam analisis sistem tenaga listrik?
4. Sebuah kapasitor dihubungkan pada sistem tiga fasa dengan tegangan saluran sebesar 400V. Kapasitor tersebut menyerap daya reaktif sebesar 1500 VAR. Hitung arus yang mengalir melalui kapasitor tersebut.
5. Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, mengapa penting untuk membedakan ketidakseimbangan yang disebabkan oleh sumber dan yang disebabkan oleh beban? Bagaimana cara mengatasi masing-masing jenis ketidakseimbangan tersebut?

BAB X SISTEM PER UNIT

Sistem Per Unit adalah suatu sistem perhitungan atau komputasi yang menyederhanakan kapasitas, parameter, dan variabel sistem tenaga listrik ke dalam bentuk perbandingan antara nilai-nilai aktual dari masing-masing peralatan (komponen) dengan suatu nilai dari komponen atau peralatan yang dianggap sebagai dasar.

Nilai dasar yang digunakan adalah kapasitas (daya) dari suatu peralatan dan tegangan dari suatu sistem jaringan yang dianggap sesuai untuk dipakai. Dari nilai dasar ini, nilai-nilai aktual komponen lainnya dibandingkan terhadapnya menurut besaran (satuan) yang sama sehingga diperoleh rasio dari peralatan lain terhadap peralatan dasar yang dianggap memiliki nilai satu. Dari nilai rasio (per unit) dan/atau besaran dasar (daya dan tegangan) diperoleh nilai per unit dan/atau nilai dasar turunan untuk besaran-besaran fisik lainnya dengan menggunakan hukum-hukum fisika yang berlaku.

Pada saluran transmisi tenaga, operasi dilakukan pada tingkat tegangan di mana kilovolt (kV) merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan tegangan. Karena besarnya daya yang harus disalurkan, kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Namun, kuantitas-kuantitas tersebut bersama-sama dengan ampere dan ohm sering juga dinyatakan sebagai suatu persentase atau per unit dari suatu nilai dasar atau referensi yang ditentukan untuk masing-masing. Misalnya, jika tegangan dasar dipilih 120 kV, maka tegangan-tegangan sebesar

108, 120, dan 126 kV berturut-turut menjadi 0,90; 1,00; dan 1,05 per unit, atau 90, 100, dan 105%. Definisi nilai per unit untuk suatu kuantitas adalah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. Perbandingan (rasio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit. Kedua metode perhitungan tersebut, baik dengan persentase maupun dengan per unit, lebih sederhana dibandingkan dengan menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya. Metode per unit mempunyai sedikit kelebihan dibandingkan metode persentase, karena hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam per unit sudah langsung diperoleh dalam per unit juga, sedangkan hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase.

Tegangan, arus, kilovolt-ampere, dan impedansi mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai dasar untuk dua saja dari kuantitas-kuantitas tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai dasar untuk kedua kuantitas lainnya. Jika nilai dasar arus dan tegangan sudah dipilih, maka nilai dasar impedansi dan kilovolt-ampere dapat ditentukan. Impedansi dasar adalah impedansi yang akan menimbulkan jatuh tegangan (*voltage drop*) padanya sebesar tegangan dasar jika arus yang mengalirinya sama dengan arus dasar. Kilovolt-ampere dasar pada sistem fasa tunggal adalah hasil perkalian dari tegangan dasar dalam kilovolt dan arus dasar dalam ampere. Biasanya, megavolt-ampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt adalah kuantitas yang dipilih untuk menentukan dasar atau referensi. Jadi, untuk sistem fasa tunggal atau sistem fasa tiga di mana istilah arus berarti arus

saluran, istilah tegangan berarti tegangan ke netral, dan istilah kilovolt-ampere berarti kilovolt-ampere per fasa, berlaku rumus-rumus berikut ini untuk hubungan bermacam-macam kuantitas:

1. Arus Fasa Tunggal (1ϕ):

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (10.1)$$

Di mana:

I_{base} adalah arus dasar (ampere)

S_{base} adalah daya dasar (VA atau MVA)

V_{base} adalah tegangan dasar (V atau kV)

2. Impedansi Dasar (1ϕ):

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (10.2)$$

Di mana:

Z_{base} adalah impedansi dasar (ohm)

V_{base} adalah tegangan dasar (V atau kV)

S_{base} adalah daya dasar (VA atau MVA)

3. Impedansi Dasar (1ϕ) dalam MVA:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (10.3)$$

Di mana:

Z_{base} adalah impedansi dasar (ohm)

V_{base} adalah tegangan dasar (kV)

S_{base} adalah daya dasar (MVA)

4. Daya Dasar, kW (1ϕ):

$$P_{base} = S_{base} \cdot pf \quad (10.4)$$

Di mana:

P_{base} adalah daya dasar (kW)

S_{base} adalah daya dasar (kVA)

pf adalah faktor daya (*power factor*)

5. Daya Dasar, MW (1ϕ):

$$P_{base} = S_{base} \cdot pf \quad (10.5)$$

Di mana:

P_{base} adalah daya dasar (MW)

S_{base} adalah daya dasar (MVA)

pf adalah faktor daya (*power factor*)

6. Impedansi Per-Unit dari Suatu Elemen Rangkaian:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \quad (10.6)$$

Di mana:

Z_{pu} adalah impedansi per unit

Z_{actual} adalah impedansi aktual (ohm)

Z_{base} adalah impedansi dasar (ohm)

Dalam persamaan-persamaan di atas, subskrip 1ϕ dan LN masing-masing menunjukkan "per fasa" dan "saluran-ke-netral" untuk persamaan-persamaan yang berlaku bagi rangkaian tiga fasa. Jika persamaan-persamaan tersebut digunakan untuk rangkaian satu fasa, kVLN berarti tegangan pada saluran satu fasa, atau tegangan saluran-ke-tanah jika salah satu salurannya ditanahkan.

Suatu contoh dengan angka-angka akan memperjelas hubungan-hubungan yang baru saja dibicarakan. Misalnya, jika kVA 3ϕ dasar = 30.000 kVA, dan kVLL dasar = 120 kV, di mana subskrip 3ϕ dan LL berturut-turut berarti 'tiga fasa' dan 'antar-saluran,' maka:

Penyelesaian:

Diketahui:

kVA dasar (tiga fasa) $S_{base,3\phi} = 30.000 \text{ kVA}$

kV dasar (*line-to-line*) $= 120 \text{ kV}$

1. Menghitung tegangan dasar (*line-to-neutral*)

Untuk sistem tiga fasa, tegangan dasar *line-to-neutral* ($V_{base,LN}$) dapat dihitung dari tegangan dasar *line-to-line* ($V_{base,LL}$) dengan rumus:

$$V_{base,LN} = \frac{V_{base,LL}}{\sqrt{3}}$$

Substitusi nilai yang diberikan:

$$V_{base,LN} = \frac{V_{base,LL}}{\sqrt{3}} = \frac{120 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \approx 69,2820 \text{ kV}$$

2. Menghitung arus dasar (*line-to-neutral*)

Arus dasar (I_{base}) untuk sistem tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base,LL}}$$

Substitusi nilai yang diberikan:

$$I_{base} = \frac{30000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 120 \text{ kV}} = \frac{30000 \text{ kVA}}{207,8461 \text{ kV}} \approx 144,3376 \text{ A}$$

3. Menghitung impedansi dasar

Impedansi dasar (Z_{base}) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_{base} = \frac{V_{base,LL}^2}{S_{base}}$$

Substitusi nilai yang diberikan:

$$Z_{base} = \frac{(120kV)^2}{30000kVA} = \frac{14400}{30000} \frac{kV^2}{kVA} = 0,48 \text{ ohm}$$

4. Menghitung impedansi per-unit dari suatu elemen rangkaian
Jika kita diberikan suatu impedansi aktual Z_{actual} , impedansi per unit (Z_{pu}) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}}$$

Misalnya, jika impedansi aktual Z_{actual} adalah 0,6 ohm, maka:

$$Z_{pu} = \frac{0,6 \text{ ohm}}{0,48 \text{ ohm}} = 1,25$$

Contoh di atas jika diselesaikan menggunakan MATLAB

perintahnya sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
% Diketahui
Sbase_3ph=30000; % kVA
Vbase_LL=120; % kV
Zactual=0.6; % ohm
% Menghitung tegangan dasar (line-to-neutral)
Vbase_LN=Vbase_LL/sqrt(3);
% Menghitung arus dasar (line-to-neutral)
Ibase=Sbase_3ph/(sqrt(3)*Vbase_LL);
% Menghitung impedansi dasar
Zbase=(Vbase_LL^2)/Sbase_3ph;
% Menghitung impedansi per-unit dari suatu elemen
rangkaiian
Zpu=Zactual/Zbase;
% Menampilkan hasil
fprintf('Tegangan dasar : %.2f kV\n',Vbase_LN)
fprintf('Arus dasar : %.2f A\n',Ibase*1000)
fprintf('Impedansi dasar : %.2f ohm\n',Zbase)
fprintf('Impedansi per-unit : %.2f pu\n',Zpu)
```

Jika kode MATLAB di atas dijalankan, maka akan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tegangan dasar : 69.28 kV
Arus dasar : 144337.57 A
Impedansi dasar : 0.48 ohm
Impedansi per-unit : 1.25 pu

Sudah tentu, nilai megawatt dan megavolt-ampere dapat saja menggantikan nilai kilowatt dan kilovolt-ampere untuk seluruh pembahasan di atas. Jika tidak dinyatakan lain, suatu nilai dasar tegangan dalam suatu sistem tiga fasa adalah tegangan antar-saluran, dan suatu nilai dasar kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah nilai dasar untuk total tiga fasa. Impedansi dasar dan arus dasar dapat langsung dihitung dari nilai-nilai tiga fasa untuk kilovolt dasar dan kilovolt-ampere dasar. Jika diartikan bahwa kilovolt-ampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt secara berturut-turut sama dengan kilovolt-ampere dasar untuk total tiga fasa dan tegangan dasar antar-saluran, maka diperoleh:

1. Menentukan impedansi dasar:

Rumus:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3} \times I_{base}} \quad (10.7)$$

Keterangan:

Z_{base} adalah impedansi dasar

V_{base} adalah tegangan dasar antar saluran

I_{base} adalah arus dasar

Faktor $\sqrt{3}$ digunakan karena ini adalah sistem tiga fasa

2. Menghitung impedansi dalam per unit:

Rumus:

$$Z_{L,pu} = \frac{Z_L}{Z_{base}} \quad (10.8)$$

Keterangan:

$Z_{L,pu}$ adalah impedansi saluran dalam per unit

Z_L adalah impedansi saluran sebenarnya

Z_{base} adalah impedansi dasar yang telah dihitung sebelumnya

3. Menghitung tegangan dalam per unit pada rel sub station

Rumus:

$$V_{an,pu} = V_{load,pu} + Z_{L,pu} \times I_{pu} \quad (10.9)$$

Keterangan:

$V_{an,pu}$ adalah tegangan antar saluran pada rel substation dalam per unit

$V_{load,pu}$ adalah tegangan beban dalam per unit

$Z_{L,pu}$ adalah impedansi saluran dalam per unit

I_{pu} adalah arus dalam per unit

4. Menghitung hasil perkalian dalam perunit

Rumus:

$$Z_{L,pu} \times I_{pu} = |Z_{L,pu}| \angle (\theta_{Z_L} + \theta_I) \quad (10.10)$$

Keterangan:

Mengalikan dua bilangan kompleks dalam bentuk polar

$|Z_{L,pu}|$ adalah magnitudo impedansi saluran dalam per menit

θ_{Z_L} adalah sudut fase impedansi saluran

θ_I adalah sudut fase arus

5. Mengkonversi ke bentuk kompleks

Rumus:

$$V_{an,pu} = a + jb \quad (10.11)$$

$$Z_{L,pu} \times I_{pu} = c + jd$$

Keterangan:

Mengonversi bilangan kompleks dari bentuk polar ke bentuk kartesian (*rectangular*)

a dan b adalah komponen real dan imajiner $V_{load,pu}$

c dan d adalah komponen real dan imajiner $Z_{L,pu} \times I_{pu}$

6. Menjumlahkan komponen kompleks

$$V_{an,pu} = (a + c) + j(b + d) \quad (10.12)$$

$$V_{an,pu} = \sqrt{(a + c)^2 + (b + d)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{b + d}{a + c} \right)$$

Keterangan:

Menjumlahkan komponen real dan imajiner dari dua bilangan kompleks

Mengonversi kembali hasil penjumlahan ke bentuk polar

7. Mengonversi ke tegangan nyata

Rumus:

$$V_{an} = V_{an,pu} \times \frac{V_{base}}{\sqrt{3}} \quad (10.13)$$

Keterangan:

- V_{an} adalah tegangan antar saluran pada rel substation dalam satuan volt
- $V_{an,pu}$ adalah tegangan antar saluran pada rel substation dalam per unit
- V_{base} adalah tegangan dasar antar saluran
- Faktor $\sqrt{3}$ digunakan karena mengonversi dari tegangan antar saluran ke tegangan fase

Contoh 10.1:

Tegangan terminal dari sebuah beban terhubung Y yang terdiri atas tiga impedansi yang sama besar $20 \angle 30^\circ \Omega$ adalah 4,4 kV antar saluran. Impedansi pada masing-masing saluran dari ketiga saluran yang menghubungkan beban ke rel di sebuah substation adalah $Z_L = 1,4 \angle 75^\circ \Omega$. Tentukanlah tegangan antar saluran pada real substation dengan menggunakan metode per unit, dengan tegangan dasar 4,4 kV dan arus dasar 127 A sehingga baik besarnya tegangan maupun besarnya arus 1,0 per unit.

Solusi:

1. Menentukan impedansi dasar:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{4400V}{\sqrt{3} \times 127A} \approx 20,0027A$$

Oleh karena itu, besarnya impedansi beban adalah juga 1,0 per unit.

2. Impedansi kawat dalam satuan per unit:

$$Z_{L,pu} = \frac{Z_L}{Z_{base}} = \frac{1,4 \angle 75^\circ}{20} = 0,07 \angle 75^\circ \text{ pu}$$

3. Menghitung tegangan perunit pada rel substation:

$$V_{an,pu} = V_{load,pu} + Z_{L,pu} \times I_{pu}$$

Karena tegangan beban $V_{load,pu} = 1\angle 30^\circ$ pu dan arus $I_{pu} = 1\angle -30^\circ$ pu (menggunakan konsep arus searah tegangan pada beban):

$$V_{an,pu} = 1\angle 30^\circ + 0,07\angle 75^\circ (1\angle -30^\circ)$$

4. Menghitung hasil perkalian dalam per unit:

$$0,07\angle 75^\circ \times (1\angle -30^\circ) = 0,07\angle (75^\circ - 30^\circ) = 0,07\angle 45^\circ$$

Maka,

$$V_{an,pu} = 1\angle 30^\circ + 0,07\angle 45^\circ$$

5. Mengonversi ke bentuk kompleks:

$$V_{an,pu} = 1\angle 30^\circ = 0,866 + j0,5$$

$$0,07\angle 45^\circ = 0,07(\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ) = 0,07(0,707 + j0,707) = 0,0495 + j0,0495$$

6. Menjumlahkan komponen kompleks:

$$V_{an,pu} = (0,866 + 0,0495) + j(0,5 + 0,0495) = 0,9155 + j0,5495$$

$$V_{an,pu} = \sqrt{0,9155^2 + 0,5495^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{0,5495}{0,9155} \right) \approx 1,07\angle 31^\circ$$

7. Mengonversi kembali ke tegangan nyata:

$$V_{an} = V_{an,pu} \times V_{base} = 1,07 \times \frac{4400V}{\sqrt{3}} \approx 2,72 \text{ kV}$$

Maka, tegangan antar saluran pada rel substation adalah sekitar 2,72 kV

Jika contoh 11.1 dikerjakan dengan menggunakan MATLAB maka kode penyelesaiannya sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
% Parameters given in the problem
```

```

Vbase=4400; % Tegangan dasar dalam volt
Ibase=127; % Arus dasar dalam ampere
Zload=20*exp(1i*deg2rad(30)); % Impedansi beban
Zline=1.4*exp(1i*deg2rad(75)); % Impedansi saluran
% Menghitung impedansi dasar
Zbase=Vbase/(sqrt(3)*Ibase); % Impedansi dalam ohm
% Nilai per unit
Zload_pu=Zload/Zbase; % Impedansi beban
Zline_pu=Zline/Zbase; % Impedansi saluran
% Nilai per unit tegangan dan arus
Vload_pu=1*exp(1i*deg2rad(30));
I_pu=1*exp(-1i*deg2rad(30));
% Tegangan di substation dalam per unit
Vsub_pu=Vload_pu+Zline_pu*I_pu;
% Konversi kembali tegangan per unit ke tegangan aktual
Vsub=abs(Vsub_pu)*(Vbase/sqrt(3)); % line-neutral volt
Vsub_ll=Vsub*sqrt(3); % Tegangan antar saluran
% Menampilkan hasil
disp(['Impedansi dasar (Zbase) : ',...
num2str(Zbase), ' ohm'])
disp(['Impedansi beban (per unit) : ',...
num2str(real(Zload_pu)), ' + ',...
num2str(imag(Zload_pu)), 'i'])
disp(['Impedansi saluran (per unit) : ',...
num2str(real(Zline_pu)), ' + ',...
num2str(imag(Zline_pu)), 'i'])
disp(['Tegangan substation (per unit) : ',...
num2str(real(Vsub_pu)), ' + ',...
num2str(imag(Vsub_pu)), 'i'])
disp(['Tegangan substation (line-line): ',...
num2str(Vsub_ll), ' kV'])
% Visualisasi menggunakan diagram fasor
figure;
hold on;
% Plot Vload_pu
quiver(0,0,real(Vload_pu),imag(Vload_pu),'r',...
'LineWidth',3,'MaxHeadSize',0.5);
text(real(Vload_pu)/2,imag(Vload_pu)/2,...
'V_{load} (pu)','HorizontalAlignment','right');
% Plot Zline_pu * I_pu
Zline_I_pu=Zline_pu*I_pu;

```

```

quiver(real(Vload_pu), imag(Vload_pu), ...
       real(Zline_I_pu), imag(Zline_I_pu), 'b', ...
       'LineWidth', 3, 'MaxHeadSize', 0.5);
text(real(Vload_pu)+real(Zline_I_pu)/2, ...
     imag(Vload_pu)+imag(Zline_I_pu)/2, ...
     'Z_{line} * I (pu)', 'HorizontalAlignment', 'right');
% Plot Vsub_pu
quiver(0,0, real(Vsub_pu), imag(Vsub_pu), 'g', ...
       'LineWidth', 3, 'MaxHeadSize', 0.5);
text(real(Vsub_pu)/2, imag(Vsub_pu)/2, ...
     'V_{sub} (pu)', 'HorizontalAlignment', 'left');
% Setting plot
axis equal;
grid on;
xlabel('Re');
ylabel('Im');
title('Phasor Diagram in Per Unit System');
legend('V_{load} (pu)', 'Z_{line} * I (pu)', ...
       'V_{sub} (pu)', 'Location', 'best');
hold off;

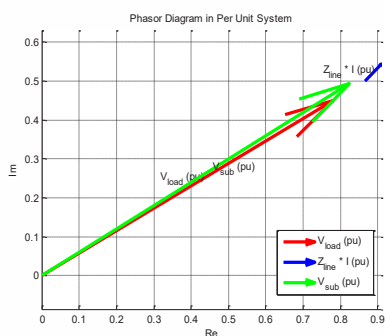
```

Jika kode di atas dijalankan, maka akan didapatkan hasil sebagai berikut:

```

Impedansi dasar (Zbase)           : 20.0027 ohm
Impedansi beban (per unit)       : 0.86591 + 0.49993i
Impedansi saluran (per unit)     : 0.018115 + 0.067606i
Tegangan substation (per unit)    : 0.91552 + 0.54949i
Tegangan substation (line-line)  : 4698.1414 kV

```



Gambar 10.1 Phasor Diagram in Per Unit System

Latihan

1. Sebuah generator memiliki nilai dasar 500 MVA dan tegangan dasar 13,8 kV. Jika tegangan aktual pada terminal generator adalah 14,5 kV, hitunglah tegangan per-unit dan tentukan apakah tegangan ini berada di atas atau di bawah nilai dasar.
2. Diberikan sistem tenaga listrik dengan nilai dasar tegangan 33 kV dan daya dasar 100 MVA. Jika suatu komponen memiliki impedansi aktual sebesar 0,8 ohm, hitunglah nilai per-unit impedansi tersebut. Selain itu, jelaskan langkah-langkah perhitungan yang dilakukan.
3. Sebuah transformator tiga fasa memiliki nilai dasar 250 MVA dan tegangan dasar antar saluran 66 kV. Hitunglah nilai per-unit dari sebuah impedansi 1,2 ohm yang terhubung pada sisi sekunder transformator tersebut. Jelaskan pula bagaimana perubahan pada nilai dasar tegangan dan daya mempengaruhi nilai per-unit.
4. Suatu saluran transmisi memiliki impedansi $0,15 + j0,45$ ohm dan beroperasi pada sistem dengan tegangan dasar 230 kV dan daya dasar 150 MVA. Tentukan impedansi per-unit dan jelaskan implikasi dari penggunaan nilai per-unit dalam analisis sistem ini.
5. Dalam suatu sistem tiga fasa, diketahui nilai dasar daya 75 MVA dan tegangan dasar 11 kV. Jika arus aktual pada sistem adalah 300 A, hitunglah arus per-unit dan diskusikan bagaimana nilai ini dapat digunakan dalam pengoperasian dan analisis sistem tenaga listrik.

MENGUBAH KUANTITAS DASAR PER UNIT

A. Mengubah Kuantitas Dasar Per Unit

Kadang-kadang impedansi per-unit untuk suatu komponen dari suatu sistem dinyatakan menurut dasar yang berbeda dengan dasar yang dipilih untuk bagian lain dari sistem di mana komponen tersebut berada. Karena semua impedansi dalam bagian manapun dari suatu sistem harus dinyatakan dengan dasar impedansi yang sama, maka dalam melakukan perhitungan perlu mengubah impedansi per-unit dari suatu dasar ke dasar yang lain. Dengan mensubstitusikan impedansi dasar yang diberikan oleh persamaan (3.3) atau (3.10) ke dalam persamaan (3.7), maka akan diperoleh impedansi per-unit dari suatu elemen rangkaian:

Persamaan (3.3):

$$Z_{pu} = \frac{Z \times kVA}{(kV)^2}$$

Persamaan (3.10):

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}}$$

Persamaan (3.7):

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}}$$

Dengan mensubstitusikan impedansi dasar yang diberikan dalam persamaan (3.3) atau (3.10) ke dalam persamaan (3.7), maka akan diperoleh impedansi per-unit dari suatu elemen rangkaian (11.1):

$$\text{impedansi sebenarnya } (\Omega) = \frac{\text{impedansi per – unit} \times (\text{kVA dasar})}{(\text{tegangan dasar (kV)})^2}$$

Persamaan (11.1) memperlihatkan bahwa impedansi per unit berbanding lurus dengan kilovolt-ampere dasar dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan dasar. Oleh karena itu, untuk mengubah dari impedansi per-unit menurut suatu dasar yang diberikan menjadi impedansi per unit menurut suatu dasar yang baru, dapat digunakan persamaan berikut (11.2):

$$Z_{pu \text{ baru}} = Z_{pu \text{ diberikan}} \left(\frac{\text{kVA dasar baru}}{\text{kVA dasar diberikan}} \right) \left(\frac{\text{tegangan dasar diberikan}}{\text{tegangan dasar baru}} \right)^2$$

Persamaan ini tidak ada kaitannya dengan transfer nilai-ohm suatu impedansi dari satu sisi ke sisi yang lain pada transformator. Persamaan ini sangat berguna untuk mengubah suatu impedansi per-unit yang diberikan menurut suatu dasar tertentu ke dasar yang baru.

Contoh 11.1

X'' adalah reaktansi generator yang diketahui sebesar 0,25 per unit berdasarkan peringkat yang tertera pada pelat nama generator tersebut, yaitu 18 kV, 500 MVA. Dasar untuk perhitungannya adalah 20 kV, 100 MA. Hitungan X'' menggunakan dasar yang baru.

Penyelesaian:

Tentukan reaktansi perunit awal

- Reaktansi per-unit awal (X'') = 0,25 per unit
- Tegangan dasar awal ($V1$) = 18kV
- Daya dasar awal ($S1$) = 500 MVA

Tentukan dasar perhitungan baru

- Tegangan dasar baru (V_2) = 20 kV
- Daya dasar baru (S_2) = 100 MVA

Gunakan rumus konversi reaktansi per unit

$$X''_{baru} = X''_{lama} \times \left(\frac{S_2}{S_1}\right) \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

$$X''_{baru} = 0,25 \times \left(\frac{100}{500}\right) \times \left(\frac{18}{20}\right)^2$$

$$X''_{baru} = 0,25 \times \left(\frac{100}{500}\right) \times \left(\frac{18}{20}\right)^2$$

$$X''_{baru} = 0,25 \times 0,20 \times 0,81$$

$$X''_{baru} = 0,25 \times \left(\frac{100}{500}\right) \times \left(\frac{18}{20}\right)^2$$

$$X''_{baru} = 0,0405$$

Hasil akhir

Reaktansi per unit (X'') berdasarkan dasar yang baru (20 kV, 100 MA) adalah 0,0405 per unit.

Berdasarkan contoh 12.1, kode MATLAB untuk menghitung reaktansi per-unit berdasarkan dasar yang baru:

```
clear all
clc
close all
% Reaktansi per unit awal (X'')
X_initial=0.25;
% Dasar perhitungan awal
V1=18; % kV
S1=500; % MVA
% Dasar perhitungan baru
V2=20; % kV
S2=100; % MVA
% Rumus konversi reaktansi per unit
X_new=X_initial*(S2/S1)*(V1/V2)^2;
% Tampilkan hasil
fprintf('Reaktansi per-unit (X''): %.4f per unit\n',X_new)
```

Kode ini akan menghitung dan menampilkan reaktansi per unit berdasarkan dasar baru. Jalankan kode ini di MATLAB hasilnya sebagai berikut:

Reaktansi per-unit (X''): 0.0405 per unit

B. Diagram Segaris

Selanjutnya akan dijelaskan bagaimana melukiskan suatu rakitan komponen untuk membuat model sistem yang lengkap. Karena sistem fasa tiga yang seimbang selalu diselesaikan sebagai rangkaian fasa tunggal yang terdiri atas salah satu dari ketiga salurannya dan suatu jalur kembali netral, jarang diperlukan untuk menunjukkan lebih dari satu fasa dan sebuah jalur kembali saat melukiskan diagram rangkaian tersebut. Bahkan, diagram semacam ini sering disederhanakan lebih lanjut dengan menghilangkan rangkaian pelengkap melalui netralnya dan menunjukkan bagian-bagian komponen dengan lambang standar yang menggantikan rangkaian ekivalennya. Parameter rangkaian tidak ditunjukkan, dan sebuah saluran transmisi digambarkan sebagai satu garis saja di antara kedua ujungnya. Diagram sistem listrik yang disederhanakan semacam ini disebut diagram segaris (*one-line diagram*). Dengan satu garis tunggal dan lambang standar, diagram ini menunjukkan saluran transmisi dan peralatan yang berhubungan dalam suatu sistem listrik.

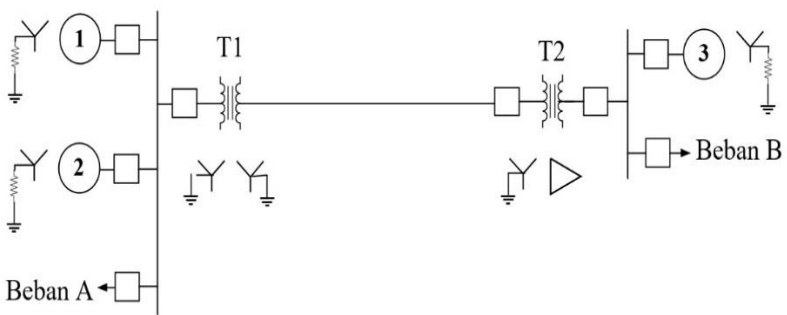
Kegunaan diagram segaris ini adalah untuk memberikan keterangan penting tentang sistem dalam bentuk yang ringkas. Pentingnya berbagai ciri suatu sistem berbeda tergantung pada masalah yang ditinjau, dan banyaknya keterangan yang dimasukkan dalam diagram tergantung pada tujuan pembuatannya. Misalnya, letak pemutus rangkaian dan *relay* tidak penting dalam studi beban. Pemutus dan *relay* tidak diperlihatkan jika fungsi utama diagram adalah memberikan keterangan untuk studi semacam itu. Sebaliknya, penentuan kestabilan suatu sistem

dalam keadaan peralihan yang disebabkan oleh suatu gangguan tergantung pada kecepatan *relay* dan pemutus rangkaian dalam memisahkan bagian sistem yang mengalami gangguan. Oleh karena itu, keterangan mengenai pemutus rangkaian menjadi sangat penting. Kadang-kadang diagram segaris memberikan keterangan mengenai transformator arus dan transformator potensial yang menghubungkan relay ke sistem atau yang dipasang untuk keperluan pengukuran. Keterangan yang didapat dari diagram segaris dapat bervariasi tergantung pada masalah yang sedang ditangani dan sesuai dengan praktik atau kebiasaan perusahaan yang menyediakan diagram tersebut. Penting untuk mengetahui letak titik-titik di mana suatu sistem dihubungkan ke tanah supaya besar arus yang mengalir dapat dihitung jika terjadi gangguan tidak simetris yang melibatkan tanah.

Jika suatu resistor atau reaktor diselipkan di antara netral Y dan tanah untuk membatasi aliran arus ke tanah saat ada gangguan, lambang yang sesuai untuk resistansi atau induktansi dapat ditambahkan pada lambang standar untuk Y yang ditanahkan. Kebanyakan netral transformator dalam sistem transmisi selalu ditanahkan secara langsung. Netral generator biasanya ditanahkan melalui resistansi yang cukup tinggi dan kadang-kadang melalui kumparan induktansi.

Gambar di bawah adalah diagram segaris dari sistem daya yang sangat sederhana. Dua generator, satu ditanahkan melalui reaktor dan satu lagi melalui resistor, dihubungkan ke rel dan melalui transformator peningkat tegangan (*step-up transformer*) ke saluran transmisi. Sebuah generator lain, yang ditanahkan melalui reaktor, dihubungkan ke rel dan melalui

transformator pada ujung lain dari saluran transmisi. Sebuah beban dihubungkan ke masing-masing rel. Pada diagram tersebut, keterangan mengenai beban, rating generator, transformator, dan reaktansi berbagai komponen rangkaian sering juga diberikan.

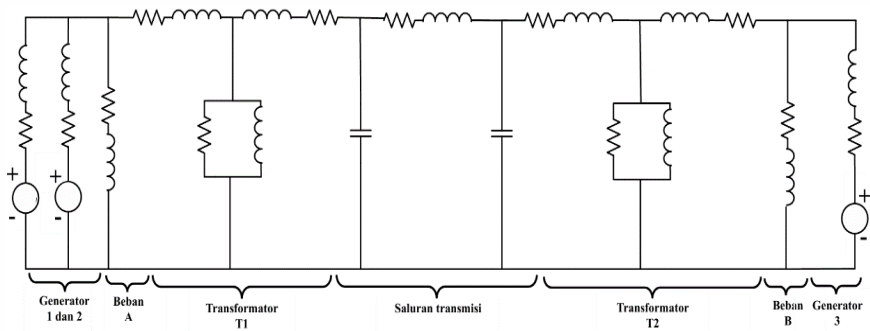


Gambar 11.1 Diagram Segaris Suatu Sistem Tenaga Listrik Sederhana

C. Diagram Impedansi dan Diagram Reaktansi

Diagram Impedansi dan Diagram Reaktansi digunakan untuk menghitung kinerja suatu sistem saat berada dalam kondisi beban atau saat terjadi gangguan. Diagram segaris digunakan untuk menggambarkan rangkaian ekivalen fasa-tunggal dari sistem tersebut. Gambar 8.4 menggabungkan rangkaian ekivalen dari berbagai komponen yang terlihat pada Gambar 3.3 untuk membentuk diagram impedansi sistem. Jika ingin melakukan studi beban, beban tersisa A dan B digambarkan dengan resistansi dan reaktansi induktif secara seri. Diagram impedansi tidak mencakup impedansi

pembatas arus yang ditunjukkan dalam diagram segaris antara netral generator dan tanah karena dalam kondisi seimbang tidak ada arus yang mengalir ke tanah, dan netral generator berada pada potensial yang sama dengan netral sistem.



Gambar 11.2 Diagram Impedansi Berhubungan

Hal-hal berikut ini perlu selalu diperhatikan:

1. Suatu kilovolt dasar dan kilovolt-ampere dasar dipilih pada bagian sistem. Nilai-nilai dasar untuk suatu sistem tiga fasa diartikan sebagai kilovolt antar-saluran dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere tiga fasa.
2. Pada bagian-bagian lain dari sistem, yaitu pada sisi lain dari transformator, kilovolt dasar untuk masing-masing bagian ditentukan menurut perbandingan tegangan antar-saluran transformator. Kilovolt-ampere dasar adalah sama di semua bagian sistem. Akan sangat memudahkan jika kilovolt dasar masing-masing bagian sistem ditunjukkan pula pada diagram segaris.

3. Keterangan yang tersedia tentang impedansi transformator tiga fasa biasanya adalah dalam per satuan atau persen atas dasar yang ditentukan menurut rating transformator.
4. Untuk tiga buah transformator satu fasa yang dihubungkan sebagai satuan tiga fasa, rating tiga fasanya ditentukan dari rating satu fasa masing-masing transformator. Impedansi dalam persen untuk satuan tiga fasa adalah sama dengan impedansi dalam persen untuk masing-masing transformator itu sendiri.
5. Impedansi per satuan yang diberikan atas dasar yang lain daripada yang ditentukan untuk bagian dari sistem di mana elemen itu berada harus diubah ke dasar yang semestinya.

Contoh 11.2

Sebuah generator tiga fasa 20 kV, 300 MVA memiliki reaktansi sub-peralihan sebesar 20%. Generator tersebut mencatu beberapa motor secara serempak melalui saluran transmisi sepanjang 64 km (40 mil) yang memiliki transformator pada kedua ujungnya, seperti diperlihatkan pada diagram segaris di Gambar di bawah. Motor-motor yang semuanya memiliki rating 13,2 kV dilukiskan sebagai dua buah motor ekuivalen saja. Netral dari salah satu motor tersebut, $M1$, dihubungkan ke tanah melalui reaktansi. Netral dari motor kedua, $M2$, tidak dihubungkan ke tanah (suatu keadaan yang tidak biasa). Masukan nominal untuk $M1$ dan $M2$ masing-masing adalah 200 MVA dan 100 MVA. Untuk kedua motor tersebut, $X'' = 20\%$. Transformator tiga fasa $T1$ memiliki rating 350 MVA, 230/20 kV dengan reaktansi bocor sebesar 10%. Transformator $T2$ terdiri atas

tiga buah transformator satu fasa masing-masing dengan rating 127/13,2 kV, 100 MVA dengan reaktansi bocor sebesar 10%. Reaktansi seri saluran transmisi adalah 0,5 Ω /km. Gambarlah diagram reaktansi dengan memilih rating generator sebagai dasar pada rangkaian generator.

Penyelesaian:

Rating transformator (3 buah fasa tunggal) T2 adalah $3 \times 100 = 300$ MVA, dan perbandingan tegangan antar-salurannya adalah:

$$\sqrt{3} \times \frac{127}{13,2} = \frac{220}{13,2} \text{ kV}$$

Suatu dasar dari 300 MVA, 20 kV pada rangkaian generator memerlukan dasar 300 MVA di semua bagian sistem, dan dasar-dasar tegangan sebagai berikut:

1. Pada saluran transmisi: 230 kV (karena T1 mempunyai rating 230/20 kV)
2. Pada rangkaian motor:

$$230 \times \frac{13,2}{220} = 13,8000 \text{ kV}$$

Dasar-dasar ini diperlihatkan di antara tanda kurung pada diagram-segaris gambar 3.5.

Reaktansi transformator yang diubah ke dasar yang semestinya adalah:

Transformator T1:

$$X = 0,1 \times \frac{300}{350} = 0,0857 \text{ per unit}$$

Transformator T2:

$$X = 0,1 \times \left(\frac{13,2}{13,8} \right)^2 = 0,0915$$

Impedansi dasar saluran transmisi adalah:

$$\frac{230^2}{300} = 176,3333 \Omega$$

Reaktansi saluran transmisi adalah:

$$\frac{0,5 \times 64}{176,3333} = 0,1815 \text{ per unit}$$

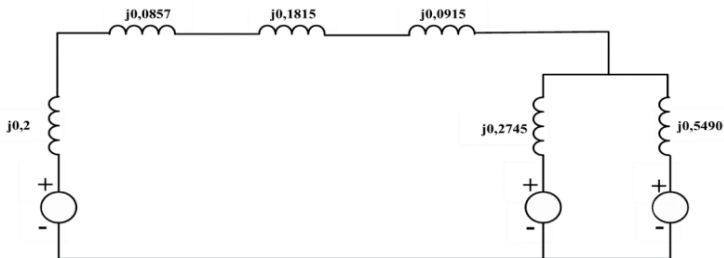
Reaktansi motor:

- Motor M1:

$$X = 0,2 \times \frac{300}{200} \times \left(\frac{13,2}{13,8}\right)^2 = 0,2745 \text{ per unit}$$

- Motor M2:

$$X = 0,2 \times \frac{300}{100} \times \left(\frac{13,2}{13,8}\right)^2 = 0,5490 \text{ per unit}$$



Latihan

1. Sebuah generator 25 kV, 400 MVA memiliki reaktansi subtransien sebesar 18%. Sistem tersebut mencatu beberapa motor melalui saluran transmisi 80 km dengan reaktansi seri $0,45 \Omega/\text{km}$ dan transformator di kedua ujung saluran. Hitung reaktansi per unit dari setiap komponen sistem dengan dasar 400 MVA dan 25 kV.
2. Sebuah transformator dengan rating 500 MVA, 220/33 kV memiliki reaktansi bocor sebesar 10%. Transformator

- tersebut menghubungkan generator dan motor melalui saluran transmisi 70 km dengan reaktansi seri $0,4 \Omega/\text{km}$. Hitung reaktansi per unit transformator dan saluran transmisi tersebut berdasarkan dasar 400 MVA dan 33 kV.
3. Sebuah motor 13,2 kV, 150 MVA memiliki reaktansi sub-transien sebesar 22%. Hitung reaktansi per unit motor tersebut berdasarkan dasar 13,2 kV, 250 MVA. Kemudian, ubah dasar perhitungan menjadi 12,8 kV, 200 MVA dan hitung kembali reaktansi per unitnya.
 4. Evaluasi sistem tenaga yang terdiri dari dua generator, tiga transformator, dan dua saluran transmisi. Generator pertama memiliki rating 20 kV, 300 MVA dengan reaktansi sub-transien 20%. Generator kedua memiliki rating 15 kV, 200 MVA dengan reaktansi sub-transien 25%. Hitung reaktansi per unit seluruh komponen dengan dasar 300 MVA dan 20 kV.
 5. Berdasarkan sistem tenaga yang terdiri dari generator 25 kV, 500 MVA dengan reaktansi sub-transien 20%, transformator 220/25 kV dengan reaktansi bocor 10%, saluran transmisi 100 km dengan reaktansi $0,35 \Omega/\text{km}$, dan motor 13,2 kV, 200 MVA dengan reaktansi sub-transien 25%. Gambarlah diagram reaktansi dari sistem tersebut dan hitung reaktansi per unit setiap komponen berdasarkan dasar 500 MVA dan 25 kV.

BAB XII

KESETARAAN SUMBER

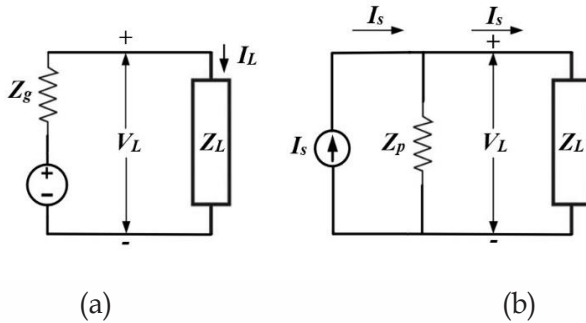
Perkembangan besar yang terus-menerus terhadap komputer digital berkecepatan tinggi telah membawa perubahan signifikan pada pentingnya berbagai teknik penyelesaian masalah jaringan yang luas. Penyelesaian dengan komputer digital tergantung pada persamaan jaringan. Oleh karena itu, bagi seorang insinyur sistem tenaga, penting sekali untuk memahami rumusan persamaan-persamaan yang menjadi dasar program komputer yang dipakai untuk mendapatkan penyelesaian masalah.

Pembahasan di sini tidak dimaksudkan sebagai kupasan lengkap dan terperinci tentang persamaan jaringan, tetapi akan memberikan gambaran tentang metode analisis yang sangat penting dan menentukan dalam program penyelesaian dengan komputer.

Hal yang penting dalam pembahasan ini terutama adalah diperkenalkannya admitansi rel dan matriks impedansi yang sangat berguna dalam pembahasan-pembahasan selanjutnya.

Suatu prosedur yang sangat membantu dalam beberapa masalah analisis jaringan adalah penggantian suatu sumber arus konstan dalam hubungan paralel dengan impedansi untuk suatu emf konstan dan impedansi seri. Kedua bagian dari gambar 12.1 melukiskan rangkaian-rangkaian tersebut. Kedua sumber dengan masing-masing impedansinya yang sesuai dihubungkan pada suatu jaringan berkutub-dua (*two-terminal network*) yang mempunyai suatu impedansi masukan Z_i . Untuk sementara

beban tersebut dapat dianggap sebagai jaringan pasif, yang berarti bahwa setiap emf dalam jaringan beban diasumsikan terhubung-singkat dan setiap sumber arus dalam keadaan terbuka.



Gambar 12.1 Rangkaian-rangkaian yang Melukiskan Kesetaraan Sumber

Untuk rangkaian yang memiliki emf konstan E_g dan impedansi seri Z_g , tegangan pada beban adalah:

$$V_L = E_g - I_L Z_g \quad (12.1)$$

di mana I_L adalah arus beban. Untuk rangkaian yang memiliki suatu sumber arus konstan I_s dengan impedansi shunt Z_p , tegangan pada beban adalah:

$$V_L = (I_s - I_L)Z_p = I_s Z_p - I_L Z_p \quad (12.2)$$

Kedua sumber dengan masing-masing impedansinya akan menjadi setara (ekivalen) jika tegangan V_L dalam kedua rangkaian tersebut sama. Tentu saja, nilai V_L yang sama akan

berarti arus beban yang sama pula untuk beban-beban yang identik.

Dengan membandingkan persamaan (12.1) dan (12.2), terlihat bahwa V_L pada kedua rangkaian akan menjadi identik dan karena itu emf dan impedansi serinya dapat dipertukarkan dengan sumber arus dan impedansi shunt-nya, asal:

$$E_g = I_s Z_p \quad (12.3)$$

Dan

$$Z_g = Z_p \quad (12.4)$$

Hubungan ini menunjukkan bahwa suatu sumber arus konstan dan impedansi shunt-nya dapat digantikan dengan suatu emf konstan dan impedansi serinya, jika emf itu sama dengan hasil kali arus konstan dengan impedansi shunt, dan jika impedansi seri sama (*valence of sources*) yang dihubungkan pada jala-jala pasif. Dengan meninjau prinsip superposisi, dapat dibuktikan bahwa hal yang sama berlaku juga jika keluarannya (*output*) merupakan suatu jaringan aktif, yaitu jaringan yang mengandung sumber tegangan dan arus.

Jika jaringan keluaran adalah aktif, prinsip superposisi mengharuskan untuk menghubungkan-singkatkan semua emf pada jaringan keluaran dan menggantikan sumber-sumber arusnya dengan rangkaian terbuka, sementara impedansi-impedansinya tetap seperti semula. Jadi, bagi komponen arus dari sumber yang dipertukarkan, keluaran merupakan suatu jaringan pasif. Untuk menentukan komponen-komponen arus yang disebabkan oleh sumber dalam jaringan beban, sumber emf dihubungkan-singkat dalam suatu keadaan dan sumber arusnya dibuka dalam keadaan yang lain. Jadi, hanya Z_g atau Z_p ekuivalennya saja yang terhubung pada masukan beban untuk menentukan pengaruh

sumber-sumber dalam jaringan beban tanpa memandang jenis sumber yang mencatu. Dengan menerapkan superposisi, komponen-komponen yang diberikan oleh sumber pada jaringan beban tidak tergantung pada jenis catu daya selama impedansi seri emf-nya sama dengan impedansi shunt sumber arus konstan itu. Oleh karena itu, kesetaraan tetap berlaku baik untuk jaringan beban aktif maupun pasif.

Latihan

1. Berikan penjelasan mendetail tentang bagaimana prinsip superposisi diterapkan dalam analisis kesetaraan sumber untuk jaringan aktif.
2. Jika diketahui sebuah jaringan dengan emf konstan E_g dan impedansi seri Z_g , serta sumber arus konstan I_s dengan impedansi shunt Z_p , buktikan secara matematis bahwa kedua sumber tersebut setara untuk jaringan pasif maupun aktif.
3. Sebuah jaringan memiliki sumber tegangan konstan $E_g = 10V$ dengan impedansi seri $Z_g = 5\Omega$. Ubah rangkaian ini menjadi sumber arus konstan dan impedansi shunt yang setara, lalu hitung nilai arus konstan I_s dan impedansi shunt Z_p .
4. Jelaskan dengan contoh bagaimana mengganti sumber arus konstan dengan impedansi shunt menjadi sumber tegangan konstan dengan impedansi seri dalam sebuah jaringan aktif yang mengandung sumber tegangan dan arus.
5. Dalam konteks kesetaraan sumber, apa yang terjadi jika salah satu kondisi $E_g = I_s Z_p$ atau $Z_g = Z_p$ tidak terpenuhi? Berikan contoh dan analisisnya.

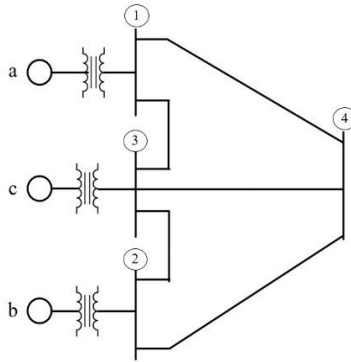
PERSAMAAN-PERSAMAAN SIMPUL

Titik-titik sambungan yang terbentuk jika dua buah elemen murni (R , L , atau C , atau suatu sumber tegangan atau arus ideal) dihubungkan satu sama lain pada ujung-ujungnya dinamakan simpul (*nodes*). Perumusan yang sistematis dari persamaan yang ditentukan pada simpul suatu rangkaian dengan menerapkan hukum arus Kirchhoff adalah dasar yang sangat berguna untuk beberapa penyelesaian masalah sistem tenaga dengan komputer. Biasanya, masalah menjadi lebih mudah jika yang ditinjau hanya simpul-simpul di mana terhubung lebih dari dua elemen. Titik sambungan semacam ini dinamakan simpul besar (*major nodes*).

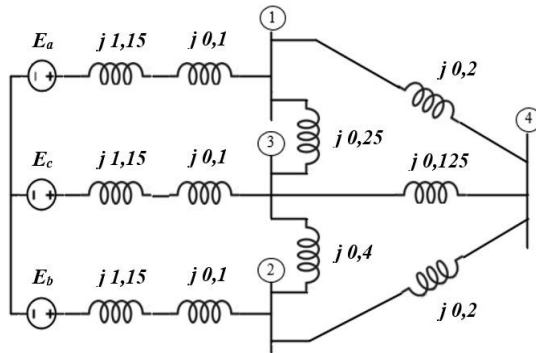
Untuk dapat mempelajari beberapa ciri persamaan simpul, pembahasan akan dimulai dengan diagram segaris suatu sistem sederhana seperti ditunjukkan pada Gambar 13.1. Generator dihubungkan pada rel-rel tegangan tinggi 1 dan 3 melalui transformator dan mencatu suatu beban motor serempak pada rel 2. Untuk keperluan analisis, semua mesin pada setiap rel diperlakukan sebagai satu mesin saja dan dilukiskan sebagai satu emf dan reaktansi seri. Diagram reaktansi, dengan reaktansi yang diberikan dalam per satuan, ditunjukkan pada Gambar 13.2. Simpul-simpul ditunjukkan dengan titik, tetapi nomor hanya diberikan pada simpul besar.

Jika rangkaian tersebut digambar kembali dengan emf dan impedansi seri yang menghubungkannya ke simpul besar digantikan dengan sumber arus ekuivalen dan admitansi shunt

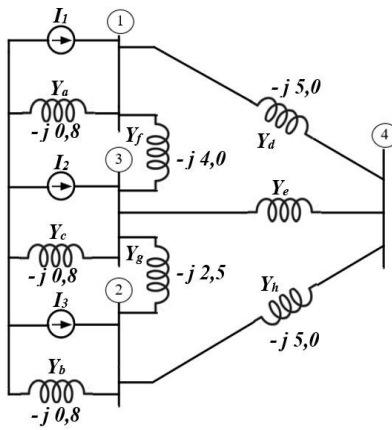
ekivalen, hasilnya adalah rangkaian seperti yang dapat dilihat pada Gambar 13.3. Nilai admitansi diperlihatkan dalam per satuan menggantikan nilai impedansi.



Gambar 13.1 Diagram Segaris Suatu Sistem Sederhana



Gambar 13.2 Diagram Reaktansi untuk Sistem pada Gambar 13.1



Gambar 13.3 Rangkaian dengan Sumber Arus Menggantikan Sumber Tegangan Ekuivalen

Notasi subskrip tunggal akan dipakai untuk menunjukkan tegangan masing-masing rel terhadap netral yang diambil sebagai simpul acuan 0 (*reference node*). Dengan menerapkan hukum arus Kirchoff pada simpul 1, yaitu menyamakan arus dari sumber yang menuju simpul tersebut dengan arus yang meninggalkannya, didapat:

$$I_1 = V_1 Y_a + (V_1 - V_3) Y_f + (V_1 - V_4) Y_d \quad (13.1)$$

Dan untuk simpul 4:

$$0 = (V_4 - V_1) Y_d + (V_4 - V_2) Y_h + (V_4 - V_3) Y_e \quad (13.2)$$

Persamaan-persamaan serupa dapat dibentuk untuk simpul-simpul 2 dan 3, dan keempat persamaan tersebut dapat diselesaikan secara serentak untuk tegangan-tegangan V_1 , V_2 , V_3 , dan V_4 . Semua arus cabang dapat ditentukan jika tegangan-tegangan ini diketahui, dan dengan demikian banyaknya

persamaan simpul yang diperlukan adalah sama dengan banyaknya simpul dalam jaringan itu dikurangi satu. Suatu persamaan simpul yang dibentuk untuk simpul acuan tidak akan menghasilkan informasi lebih lanjut. Dengan kata lain, banyaknya persamaan simpul yang berdiri bebas adalah kurang satu dari banyaknya simpul.

Kedua persamaan yang lain belum dibuat, namun di sini tidak ditunjukkan karena sudah dapat dilihat bagaimana seharusnya merumuskan persamaan simpul dalam notasi standar. Pada persamaan (13.1) dan (13.2) terlihat bahwa arus yang mengalir ke jaringan dari sumber arus yang terhubung pada suatu simpul dipersamakan dengan jumlah beberapa hasil kali. Pada setiap hasil kali, suatu simpul merupakan tegangan pada simpul itu dikalikan dengan jumlah semua admitansi yang berujung pada simpul itu. Hasil kali ini juga memberikan arus yang mengalir meninggalkan simpul itu jika tegangan pada setiap simpul yang lain adalah nol. Setiap hasil kali yang lain sama dengan negatif, tegangan pada simpul yang lain dikalikan dengan admitansi yang terhubung di antara simpul yang lain itu dan simpul di mana persamaan itu dirumuskan. Misalnya, pada simpul 1, suatu hasil kali ialah $-V_3 Y_f$, yang memberikan arus yang mengalir meninggalkan simpul 1 jika semua tegangan simpul adalah nol kecuali tegangan pada simpul 3.

Bentuk standar untuk keempat persamaan yang berdiri bebas itu dalam matriks adalah:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (13.3)$$

Simetri persamaan-persamaan dalam bentuk ini membuatnya mudah diingat, dan kemungkinan perluasannya untuk jumlah simpul yang berapapun banyaknya menjadi jelas pula. Urutan subskrip-subskrip Y adalah sesuai dengan aturan: subskrip pertama adalah untuk simpul di mana arus itu dirumuskan, dan subskrip kedua adalah untuk tegangan yang menyebabkan komponen arus itu. Matriks Y ditunjukkan dengan $Y_{rel}(Y_{bus})$ dan dinamakan matriks admitansi rel. Matriks ini simetris terhadap diagonal utamanya. Admitansi-admitansi Y_{11} , Y_{22} , Y_{33} dan Y_{44} dinamakan admitansi sendiri (*self-admittance*) pada simpul-simpul itu, dan masing-masing sama dengan jumlah semua admitansi yang berujung pada simpul yang ditandai dengan subskrip yang berulang. Admitansi yang lain adalah admitansi bersama (*mutual admittance*) simpul-simpul itu, dan masing-masing sama dengan jumlah negatif semua admitansi yang dihubungkan langsung antara simpul yang disebutkan menurut subskrip gandanya. Untuk jaringan pada Gambar 13.3, admitansi bersama Y_{13} adalah sama dengan $-Y_f$. Beberapa penulis menamakan admitansi sendiri dan bersama suatu simpul masing-masing sebagai admitansi titik-penggerak (*driving-point admittance*) dan admitansi pemindah (*transfer admittance*) simpul tersebut.

Rumus umum untuk arus sumber yang mengalir menuju simpul k suatu jaringan yang mengandung N buah simpul bebas, yaitu N buah rel selain netral, adalah:

$$I_k = \sum_{j=1}^N Y_{kj} V_j \quad (13.4)$$

Di mana:

- I_k adalah sumber arus yang mengalir menuju simpul k .
- Y_{kj} adalah elemen matriks admitansi rel (Y_{bus}) yang menunjukkan admitansi antara simpul k dan simpul j .
- V_j adalah tegangan pada simpul j .
- N adalah jumlah simpul bebas dalam jaringan.

Satu persamaan semacam itu harus dituliskan untuk masing-masing dari N rel di mana tegangan jaringannya tidak diketahui. Jika tegangan pada suatu simpul sudah ditetapkan, persamaan untuk simpul tersebut tidak perlu ditulis. Misalnya, jika besar dan sudut fase tegangan pada dua dari rel-rel tegangan-tinggi dalam contoh telah ditetapkan, hanya diperlukan dua persamaan. Persamaan-persamaan simpul hanya akan ditulis untuk kedua rel lainnya di mana tegangan-tegangannya masih belum diketahui. Suatu EMF dan impedansi seri yang telah diketahui tidak perlu digantikan dengan sumber arus ekuivalennya jika salah satu ujung elemen EMF itu dihubungkan ke simpul acuan, karena dengan demikian simpul yang memisahkan EMF dan impedansi serinya itu adalah simpul yang telah diketahui tegangannya.

Contoh 13.1

Diberikan rangkaian berikut dengan tiga simpul besar yang terdiri dari impedansi dan sumber arus. Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

Diagram Rangkaian:

- Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = j5 \Omega$
- Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = j10 \Omega$
- Node 1 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{13} = j2 \Omega$
- Sumber arus $I_1 = 10 \angle 0^\circ$ A terhubung ke Node 1
- Sumber arus $I_3 = 5 \angle 0^\circ$ A terhubung ke Node 3

Penyelesaian MATLAB:

```
clear all
clc
close al
% Define the impedances in the network
Z12=1i*5;
Z23=1i*10;
Z13=1i*2;
% Convert impedances to admittances
Y12=1/Z12;
Y23=1/Z23;
Y13=1/Z13;
% Define the admittance matrix Ybus
Ybus=[Y12+Y13, -Y12, -Y13; ...
      -Y12, Y12+Y23, -Y23; ...
      -Y13, -Y23, Y13+Y23];
disp('Matrix Ybus')
disp(Ybus)
% Define the current sources (I1, I2, I3)
I=[10;0;5];
disp('Current Sources')
disp(I)
% Solve for the node voltages
V=Ybus\I;
% Displays the node voltages
```

```
disp('Node Voltages')
disp(V)
```

Penyelesaian:

Matrix Ybus

0 - 0.7000i	0 + 0.2000i	0 + 0.5000i
0 + 0.2000i	0 - 0.3000i	0 + 0.1000i
0 + 0.5000i	0 + 0.1000i	0 - 0.6000i

Current Sources

```
10
0
5
```

Warning: Matrix is close to singular or badly scaled.
Results may be inaccurate. RCOND =
1.321694e-17.

> In contoh_141 at 28

Node Voltages

```
1.0e+17 *
0 - 2.7022i
0 - 2.7022i
0 - 2.7022i
```

Contoh 13.2

Diberikan rangkaian dengan empat simpul besar dan tiga impedansi serta satu sumber tegangan ideal. Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

- Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = 4 + j3\Omega$
- Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = 6 + j8\Omega$
- Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = 5 + j2\Omega$
- Sumber tegangan $V_s = 120\angle 0^\circ$ V terhubung antara Node 1 dan Node 4

Penyelesaian MATLAB:

```
clear all
clc
close all
% Define the impedances in the network
z12=4+1i*3;
```

```

Z23=6+1i*8;
Z34=5+1i*2;
% Convert impedances to admittances
Y12=1/Z12;
Y23=1/Z23;
Y34=1/Z34;
% Define the admittance matrix Ybus
Ybus=[Y12,-Y12,0,0;...
      -Y12,Y12+Y23,-Y23,0;...
      0,-Y23,Y23+Y34,-Y34;...
      0,0,-Y34,Y34];
% Define the voltage source (Vs) and its position
Vs=120*exp(1i*deg2rad(0));
% Since node 4 is connected to the reference (ground),
% we can remove the equation for node 4
% and solve for the remaining nodes
% Define the current sources
Ybus_reduced=Ybus(1:3,1:3);
% Define the current sources
I=[Vs*Y12;0;0];
% Solve for the node voltages
V=Ybus_reduced\I;
% Append the reference node voltage
V=[V;0];
% Display the node voltages
disp('Node Voltages')
disp(V)

```

Penyelesaian:

Node Voltages

1.0e+02 *

4.7520 + 0.3360i

3.5520 + 0.3360i

1.2480 - 0.3360i

0

Latihan

1. Diberikan rangkaian dengan empat simpul besar sebagai berikut:
 - Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = 2 + j3 \Omega$

- Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = 4 + j5 \Omega$
- Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = 3 + j2 \Omega$
- Node 1 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{14} = 6 + j7 \Omega$
- Sumber tegangan $V_s = 120 \text{ V}$ terhubung antara Node 1 dan Node 3

Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

2. Diberikan rangkaian dengan empat simpul besar dan empat impedansi serta dua sumber arus sebagai berikut:

Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = 5 + j6 \Omega$

Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = 4 + j5 \Omega$

Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = 3 + j2 \Omega$

Node 4 terhubung ke Node 1 melalui impedansi $Z_{41} = 7 + j8 \Omega$

Sumber arus $I_1 = 6 \text{ A}$ terhubung ke Node 1

Sumber arus $I_3 = 4 \text{ A}$ terhubung ke Node 3

Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

3. Diberikan rangkaian dengan lima simpul besar sebagai berikut:

Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = j6 \Omega$

Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = j8 \Omega$

Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = j4 \Omega$

Node 4 terhubung ke Node 5 melalui impedansi $Z_{45} = j3 \Omega$

Node 5 terhubung ke Node 1 melalui impedansi $Z_{51} = j7 \Omega$

Sumber arus $I_2 = 3 \text{ A}$ terhubung ke Node 2

Sumber arus $I_4 = 2 \text{ A}$ terhubung ke Node 4

Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

4. Diberikan rangkaian dengan empat simpul besar sebagai berikut:

Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = 4 + j5 \Omega$

Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = 6 + j7 \Omega$

Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = 8 + j9 \Omega$

Node 1 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{14} = 10 + j11 \Omega$

Sumber tegangan $V_s = 100 \text{ V}$ terhubung antara Node 1 dan Node 2

Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

5. Diberikan rangkaian dengan lima simpul besar sebagai berikut:

- Node 1 terhubung ke Node 2 melalui impedansi $Z_{12} = 3 + j4 \Omega$

- Node 2 terhubung ke Node 3 melalui impedansi $Z_{23} = 6 + j7 \Omega$

- Node 3 terhubung ke Node 4 melalui impedansi $Z_{34} = 5 + j6 \Omega$

- Node 4 terhubung ke Node 5 melalui impedansi $Z_{45} = 2 + j3 \Omega$

- Node 5 terhubung ke Node 1 melalui impedansi $Z_{51} = 7 + j8 \Omega$

- Sumber arus $I_1 = 4 \text{ A}$ terhubung ke Node 1

- Sumber arus $I_5 = 5 \text{ A}$ terhubung ke Node 5

Tentukan tegangan pada setiap simpul besar menggunakan persamaan nodal.

BAB XIV

STUDI ALIRAN DAYA

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya dan tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik dan menganalisis kondisi pembangkitan serta pembebanan. Analisis ini memerlukan informasi aliran daya dalam kondisi normal maupun darurat.

Analisis aliran daya dalam sistem tenaga listrik memerlukan representasi atau pemodelan komponen sistem tenaga listrik. Sistem kelistrikan tiga fasa yang seimbang selalu diselesaikan per fasa dan digambarkan dalam diagram satu garis yang sesuai dengan sistem tersebut. Tujuan diagram satu garis ini adalah untuk memberikan semua informasi yang diperlukan. Dalam berbagai kasus, diagram satu garis berbeda-beda sesuai dengan permasalahan yang akan diselesaikan. Misalnya, dalam studi aliran daya, beban-beban dan hambatan seperti impedansi, resistansi, dan induktansi harus digambarkan. Tempat netral ke tanah tidak perlu digambarkan. Pengabaian ini bertujuan untuk menyederhanakan perhitungan terutama jika perhitungan dilakukan secara manual.

Analisis aliran daya merupakan kajian terhadap daya yang ada pada setiap bus sehingga diketahui apakah bus tersebut memberikan daya atau menerima daya. Dengan demikian, analisis aliran daya mencari besar dan arah daya pada jaringan (bus). Informasi ini sangat dibutuhkan guna

mengevaluasi kinerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan serta pembebanan. Analisis aliran daya ini penting dalam perencanaan dan pengembangan sistem di masa yang akan datang karena operasi yang memuaskan pada suatu sistem tergantung pada pengetahuan faktor seperti akibat interkoneksi, akibat beban baru atau pertumbuhan beban, pusat listrik baru seperti pembangkit baru atau gardu induk baru, dan kawat penghantar baru, sebelum semuanya terpasang. Analisis aliran daya dapat dilakukan dengan mudah menggunakan komputer digital.

Tujuan aliran daya adalah untuk mengetahui besar vektor tegangan pada tiap bus dan besar aliran daya pada tiap cabang suatu jaringan untuk suatu kondisi beban tertentu dalam kondisi normal. Hasil perhitungan dapat digunakan untuk menelaah berbagai permasalahan yang berhubungan dengan jaringan tersebut, yaitu meliputi hal-hal yang berhubungan dengan operasi jaringan yaitu:

1. Pengaturan tegangan (*voltage regulation*), perbaikan faktor daya (*power factor*) jaringan, kapasitas kawat penghantar, termasuk rugi-rugi daya.
2. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru dan unit pembangkitan atau gardu induk baru.
3. Perencanaan jaringan, yaitu kondisi jaringan yang diinginkan pada masa mendatang untuk melayani pertumbuhan beban karena peningkatan kebutuhan tenaga listrik.

Dalam analisis aliran daya, terdapat empat besaran pada masing-masing bus jaringan yang ditinjau dan memegang peranan, yaitu:

1. Daya aktif P (*active power*)
2. Daya reaktif Q (*reactive power*)
3. Nilai skalar tegangan $|V|$ (*magnitude*)
4. Sudut fasa tegangan θ (*angle*)

Dua dari empat besaran tersebut sudah diketahui pada tiap bus, sedangkan dua besaran lainnya dihitung melalui proses iterasi.

Dalam studi aliran daya, bus-bus dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Bus berayun (*swing bus*), yang sering juga disebut *floating bus*, *slack bus*, atau bus referensi, dipilih di antara bus generator atau penyedia daya yang mempunyai kapasitas tertinggi di antara yang terpasang dalam jaringan yang ditinjau. Bus berayun ini harus mampu membangkitkan daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan untuk melayani bus beban dan mengimbangi rugi daya pada saluran.
2. Bus kontrol tegangan (*voltage controlled*) atau bus generator, yaitu bus yang mempunyai nilai tegangan dan daya reaktif tertentu. Tegangan pada bus ini dapat dikendalikan dengan mengatur daya reaktif yang disuplai atau diserap bus. Daya reaktif ini dispesifikasi dalam jangkauan batas minimum dan maksimum tertentu. Daya aktif dapat diatur untuk menjaga tegangan tertentu kecuali bila batas daya reaktif yang dispesifikasikan terlampaui. Jika batas ini terlampaui, maka daya reaktif ditetapkan pada batas tersebut dan tegangan

akan diberikan pada nilai yang diperlukan untuk menyelesaikan persamaan aliran daya.

3. Bus beban (*load bus*), yaitu bus yang mempunyai nilai daya aktif dan daya reaktif tertentu yang diperoleh berdasarkan pengukuran pada saat tertentu. Nilai tegangan bus beban harus dicari melalui proses iterasi sampai tercapai nilai tertentu yang konvergen dengan toleransi ketelitian yang diinginkan.

A. Kapasitor dan Reaktor *Shunt*

Dalam sistem tenaga listrik, sering diperlukan kapasitor *shunt* dan reaktor *shunt* sebagai alat kompensasi pada saluran transmisi. Kompensasi ini diperlukan, antara lain, untuk memperbaiki tegangan agar variasi tegangan tetap berada pada batas-batas yang diizinkan.

Pada kondisi kebutuhan daya aktif dan daya reaktif yang cukup besar, tegangan cenderung menurun melewati batas yang diizinkan. Oleh sebab itu, untuk mengatasi kondisi tersebut, dipasang kapasitor *shunt* yang dapat menyuplai daya reaktif sehingga tegangan dapat naik kembali. Sebaliknya, bila kebutuhan daya aktif dan reaktif sangat kecil, pengaruh dari kapasitor akan menyebabkan naiknya tegangan di sisi penerima, melewati batas yang diizinkan. Pemasangan reaktor *shunt* akan menyerap pelepasan muatan dari kapasitansi saluran sehingga tegangan turun kembali. Kapasitor dapat direpresentasikan sebagai sumber daya reaktif atau sering kali sebagai impedansi.

B. Beban (*Load*)

Ada tiga cara merepresentasikan beban dalam sistem tenaga listrik sebagai berikut:

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan: Di sini daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR) dianggap konstan. Representasi ini dipakai untuk studi aliran beban.
2. Beban direpresentasikan sebagai arus konstan: Dalam hal ini, arus beban dihitung sebagai berikut:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (14.1)$$

Substitusi untuk I_i pada persamaan (15.1), hasilnya:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (14.2)$$

Besaran skalar (*magnitudo*) dari arus I_i dijaga agar tetap konstan.

3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan: Kondisi ini sering dipakai untuk merepresentasikan beban dalam studi stabilitas. Bila daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR) diasumsikan diketahui dan menjaga agar besarnya (*magnitudo*) tetap konstan, maka impedansi Z dapat dihitung sebagai berikut:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V|^2}{P - jQ} \quad (14.3)$$

Latihan

1. Bagaimana cara menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru atau unit pembangkitan dalam perluasan jaringan menggunakan hasil analisis aliran daya?

2. Jelaskan proses iterasi yang dilakukan dalam analisis aliran daya untuk mencari nilai tegangan bus beban hingga mencapai konvergensi dengan toleransi ketelitian yang diinginkan.
3. Berikan penjelasan tentang bagaimana daya aktif dan daya reaktif diatur pada bus kontrol tegangan dan bagaimana hal ini mempengaruhi tegangan pada bus tersebut.
4. Pada kondisi tertentu, pemasangan reaktor shunt diperlukan. Jelaskan kondisi apa saja yang menyebabkan reaktor shunt harus dipasang dan bagaimana reaktor shunt bekerja untuk mengatasi masalah tersebut.
5. Jelaskan bagaimana beban yang direpresentasikan sebagai impedansi konstan dapat mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik dan bagaimana perhitungan impedansi dilakukan berdasarkan daya nyata dan daya reaktif yang diketahui.

BAB XV

METODE GAUSS-SEIDEL, NEWTON-RAPHSON & FAST- DECOUPLED

Dalam berbagai kasus, diagram satu garis berbeda-beda sesuai dengan persoalan yang akan diselesaikan. Misalnya, dalam studi aliran daya, beban-beban dan hambatan-hambatan seperti impedansi, resistansi, dan induktansi harus digambarkan. Tempat netral ke tanah tidak perlu digambarkan. Sebenarnya, pengabaian ini bertujuan untuk menyederhanakan perhitungan, terutama jika perhitungan dilakukan secara manual. Komponen-komponen dari suatu sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri dari: pusat pembangkit, dalam hal ini yang digambarkan adalah generatornya; transformator daya; saluran transmisi; kondensator sinkron arus statis; alat pengaman (pemutus daya dan relai-relai); serta beban yang terdiri dari beban dinamis dan beban statis.

A. Metode Gauss-Seidel

Persamaan (14.2) adalah persamaan nonlinier pada tiap-tiap simpul dengan dua variabel yang belum diketahui. Dengan metode Gauss-Seidel, untuk menyelesaikan V_i secara iterasi, persamaan (14.2) menjadi:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{\sum Y_{ij} V_j^{(k)}} + \sum Y_{ij} V_j^{(k)} \quad j \neq i \quad (A.1)$$

dengan Y_{ij} adalah admitansi sebenarnya per unit. P_i^{sch} dan Q_i^{sch} adalah daya aktif dan daya reaktif yang dinyatakan per

unit. Dalam penulisan hukum Arus Kirchoff, arus yang memasuki bus i diasumsikan positif. Untuk bus berbeban, daya aktif dan daya reaktif mengalir menjauhi bus, sehingga P_i^{sch} dan Q_i^{sch} bernilai negatif. Jika persamaan (14.2) diselesaikan untuk P_i dan Q_i , maka:

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n V_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq 1 \quad (A.2)$$

dan

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq 1 \quad (A.3)$$

Persamaan aliran daya biasanya dinyatakan dalam elemen matriks admitansi bus (Y_{bus}). Y_{bus} ditunjukkan dengan $Y_{ij} = -y_{ij}$, dan elemen-elemen diagonalnya $Y_{ii} = \sum y_{ij}$. Persamaan (A.1) menjadi:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)} Y_{ii}} - \sum_{j \neq 1} Y_{ij} V_j^{(k)} \quad (A.4)$$

dan

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq 1 \quad (A.5)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k Y_{ii} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (A.6)$$

Pada kondisi pengoperasian normal, besarnya tegangan setiap bus untuk perhitungan awal diasumsikan sekitar 1,00 + j0,0 per unit atau dekat dengan besarnya tegangan slack bus. Bagian imajiner dari $V_i^{(k+1)}$ pada persamaan (A.5) dinyatakan dengan:

$$\left(e_i^{(k+1)} \right)^2 + \left(f_i^{(k+1)} \right)^2 = |V_i|^2 \quad (A.7)$$

atau

$$e_i^{(k+1)} = \sqrt{|V_i|^2 - \left(f_i^{(k+1)} \right)^2} \quad (A.8)$$

dengan $e_i^{(k+1)}$ dan $f_i^{(k+1)}$ merupakan komponen imajiner dari tegangan $V_i^{(k+1)}$. Konvergensi dapat dipercepat dengan menerapkan faktor percepatan untuk tiap-tiap iterasi, yaitu:

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \left(V_i^{(k)cal} - V_i^{(k)} \right) \quad (A.10)$$

Di sini, α merupakan faktor percepatan. Nilai α ini tergantung pada setiap sistem dengan tingkatan 1,3 sampai 1,7 yang disesuaikan untuk jenis sistem. Tegangan yang didapat sekarang menggantikan tegangan sebelumnya dari tiap urutan persamaan. Proses ini berlanjut sampai komponen real dan imajiner dari tegangan bus berubah selama iterasi berlangsung, dengan:

$$|e_i^{(k+1)} - e_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad (A.11)$$

atau

$$|f_i^{(k+1)} - f_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad (A.12)$$

dengan ϵ adalah epsilon yang harganya ditetapkan. Daya aktif dan daya reaktif pada *slack bus* dihitung dari persamaan (A.5) dan (A.6).

Contoh 15.1:

Sebuah sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bus, dengan data impedansi dan beban sebagai berikut:

Data Impedansi Saluran:

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 2: $z_{12} = 0.02 + j0.04$ pu

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 3: $z_{13} = 0.01 + j0.03$ pu

Impedansi saluran antara bus 2 dan bus 3: $z_{23} = 0.0125 + j0.025$ pu

Data Beban:

Beban pada bus 2: $S_2 = 256.6 + j110.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Beban pada bus 3: $S_3 = 138.6 + j45.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Bus Data:

Bus 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $V_1 = 1.05 + j0.0$ pu

Estimasi awal tegangan pada bus 2 dan bus 3 adalah $V_2 = 1.0 + j0.0$ pu dan $V_3 = 1.0 + j0.0$ pu

Gunakan metode Gauss-Seidel untuk menghitung aliran daya pada sistem 3 bus ini. Tentukan tegangan pada masing-masing bus, aliran daya pada setiap saluran, dan rugi-rugi daya pada saluran setelah iterasi konvergen.

Berikut adalah langkah-langkah penyelesaian menggunakan kode MATLAB:

```

clear all
clc
close all

disp(' ')
disp('-----')
disp(' ')
disp('STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS ')
disp('DENGAN PENYELESAIAN METODE GAUSS-SEIDEL')
disp('OLEH: RIMBAWATI,ST.,MT ')
disp('-----')
disp(' ')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001 ;
x=1 ;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Beban dalam pr unit :
s2=-(256.6+j*110.2)/100;
s3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
Vk1=conj(V1);
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
E3=1.0+j*0.0;
iter=0;
disp(' ')
disp(' | | | | ')
disp(' | DAYA PADA | ALIRAN DAYA PADA SALURAN | ')
disp(' | Iter | SLACK BUS | | ')
disp(' | Ke : | (Bus 1) | | ')
disp(' | | | | ')
disp(' | S1 | S12 | S21 | ')
disp(' | | | | ')
disp(' ')

```

```

format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    Vk2=conj(V2);
    Ek3=conj(E3);

V2=1/(y12+y23)*((conj(s2))/(Vk2)+(y12)*(V1)+(y23)*(E3));
V3=1/(y13+y23)*((conj(s3))/(Ek3)+(y13)*(V1)+(y23)*(V2));
% Arus pada saluran :
I12=y12*(V1-V2);
I21=-I12;
%Konjugat dari arus pada saluran :
Ik12=conj(I12);
Ik21=conj(I21);
% Daya dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 1 :
s1=(Vk1*(V1*(y12+y13)-(y12*V2+y13*V3)))*100 ;
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks :
s12=V1*Ik12*100 ;
s21=V2*Ik21*100 ;
x=abs (V3-E3) ;
E3=V3 ;
fprintf('%i ', iter),disp([s1,s12,s21])
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN I |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi paa saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran:
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Beban dalam per unit :
S2=-(256.6 +j*110.2)/100;
S3=-(138.6 +j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;

```

```

Vk1=conj(V1) ;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
E3=1.0+j*0.0;
iter=0;
disp('_____')
disp(' | _____ |')
disp(' |           ALIRAN DAYA PADA SALURAN           |')
disp(' |Iter | _____ |')
disp(' |Ke : | _____ |')
disp(' |_____ |')
disp(' |           S13           |           S31           |           S23           |')
disp(' |_____ |')
disp(' |_____ |')
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter + 1 ;
    Vk2=conj (V2);
    Ek3=conj (E3);

V2=1/(y12+y23)*((conj(S2))/(Vk2)+(y12)*(V1)+(y23)*(E3));
V3=1/(y13+y23)*((conj(S3))/(Ek3)+(y13)*(V1)+(y23)*(V2));
% Arus pada saluran :
I13=y13*(V1-V3);
I31=-I13;
I23=y23*(V2-V3);
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik13=conj(I13);
Ik31=conj(I31);
Ik23=conj(I23);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks :
s13=V1*Ik13*100;
s31=V3*Ik31*100;
s23=V2*Ik23*100;
x=abs (V3-E3);
E3=V3;
fprintf ('%i', iter),disp([s13, s31, s23])
end
disp('_____')
disp(' | _____ |')
disp(' |=====|')
disp(' | LANJUTAN II |')
disp(' |=====|')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;

```

```

x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Beban dalam per unit :
S2=-(256.6+j*110.2)/100;
S3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
Vk1=conj(V1);
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
E3=1.0+j*0.0;
iter=0;
disp('
disp(' |
disp(' | ALIRAN DAYA | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN |
disp(' | Iter | PADA SALURAN | |
disp(' | Ke : | (Bus 1) | |
disp(' |
disp(' | S32 | SL12 | SL13 |
disp('
disp('
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    Vk2=conj(V2);
    Ek3=conj(E3);

V2=1/(y12+y23)*((conj(S2))/(Vk2)+(y12)*(V1)+(y23)*(E3));
V3=1/(y13+y23)*((conj(S3))/(Ek3)+(y13)*(V1)+(y23)*(V2));
% Arus pada saluran :
I12=y12*(V1-V2);
I21=-I12;
I13=y13*(V1-V3);
I31=-I13;
I23=y23*(V2-V3);
I32=-I23;
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik12=conj(I12);

```

```

Ik21=conj(I21);
Ik13=conj(I13);
Ik31=conj(I31);
Ik32=conj(I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks :
s12=V1*Ik12*100;
s21=V2*Ik21*100;
s13=V1*Ik13*100;
s31=V3*Ik31*100;
s32=V3*Ik32*100;
% Rugi-rugi daya dalam bentuk bilangan kompleks :
SL12=s12+s21;
SL13=s13+s31;
x=abs(V3-E3);
E3=V3;
fprintf('%i', iter),disp([s32, SL12, SL13])
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN III |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Beban dalam per unit :
s2=- (256.6+j*110.2)/100 ;
s3=- (138.6+j*45.2)/100 ;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
v1=1.05 + j*0.0 ;
vk1=conj(v1) ;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0 ;
E3=1.0+j*0.0 ;
iter=0 ;
disp('_____')
disp('| | |')

```

```

disp(' | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN | ')
disp(' | Iter | | ')
disp(' | Ke : | | ')
disp(' | _____ | ')
disp(' | SL23 | | ')
disp(' _____ ')
disp(' ')
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    VK2=conj(V2);
    EK3=conj(E3);

V2=1/(y12+y23)*((conj(S2))/(VK2)+(y12)*(V1)+(y23)*(E3));

V3=1/(y13+y23)*((conj(S3))/(EK3)+(y13)*(V1)+(y23)*(V2));
% Arus pada saluran :
I23=y23*(V2-V3);
I32=-I23;
% Konjugat dari arus pada saluran :
IK23=conj(I23);
IK32=conj(I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks :
S23=V2*Ik23*100;
S32=V3*IK32*100;
% Rugi-rugi daya dalam bentuk bilangan kompleks :
SL23=S23+S32;
x=abs(V3-E3);
E3=V3;
fprintf('%i', iter),disp([SL23])
end
disp(' _____ ')

```

Dari program di atas, bila di-run, hasilnya adalah:

 STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS
 DENGAN PENYELESAIAN METODE GAUSS-SEIDEL
 OLEH: RIMBAWATI, ST., MT

Iter Ke :	DAYA PADA SLACK BUS (Bus 1)		ALIRAN DAYA PADA SALURAN			
	S1	S12	S21			
1	298.34 -	226.12i	135.93 +	109.12i	-130.42 -	98.095i
2	377.42 -	195.7i	181.1 +	88.979i	-173.7i -	74.208i
3	399.94 -	189.6i	194.0i +	84.681i	-185.88 -	68.423i
4	406.53 -	188.72i	197.79 +	83.943i	-189.42 -	67.193i
5	408.53 -	188.76i	198.94 +	83.895i	-190.49 -	66.982i
6	409.17 -	188.87i	199.3i +	83.938i	-190.83 -	66.969i
7	409.38 -	188.94i	199.43 +	83.97i	-190.94 -	66.982i
8	409.46 -	188.97i	199.48 +	83.987i	-190.98 -	66.991i
9	409.48 -	188.99i	199.49 +	83.995i	-190.99 -	66.996i

=====
 | LANJUTAN I |
 =====

Iter Ke :	ALIRAN DAYA PADA SALURAN					
	S13	S31	S23			
1	162.41 +	117i	-158.77 -	106.1i	-17.847 -	64.572i
2	196.32 +	106.72i	-191.79 -	93.131i	-52.05 -	48.104i

3	205.93 +	104.91i	-201.08 -	90.38i	-61.644 -	44.11i
4	208.73 +	104.77i	-203.79 -	89.931i	-64.395 -	43.293i
5	209.59 +	104.86i	-204.61 -	89.917i	-65.216 -	43.169i
6	209.86 +	104.93i	-204.87 -	89.953i	-65.472 -	43.17i
7	209.95 +	104.97i	-204.95 -	89.978i	-65.555 -	43.184i
8	209.98 +	104.99i	-204.98 -	89.99i	-65.584 -	43.193i
9	209.99 +	104.99i	-204.99 -	89.996i	-65.594 -	43.197i

=====
| LANJUTAN II |
=====

Iter Ke :	ALIRAN DAYA		RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN			
	PADA SALURAN (Bus 1)					
	S32		SL12		SL13	
1	18.428 +	65.733i	5.5121 +	11.024i	3.634 +	10.902i
2	52.699 +	49.403i	7.3856 +	14.771i	4.5289 +	13.587i
3	62.388 +	45.598i	8.1291 +	16.258i	4.8448 +	14.534i
4	65.175 +	44.853i	8.3751 +	16.75i	4.9476 +	14.843i
5	66.008 +	44.755i	8.4566 +	16.913i	4.9817 +	14.945i
6	66.269 +	44.765i	8.4844 +	16.969i	4.9934 +	14.98i
7	66.354 +	44.782i	8.4943 +	16.989i	4.9976 +	14.993i
8	66.384 +	44.792i	8.4978 +	16.996i	4.9991 +	14.997i
9	66.394 +	44.797i	8.4992 +	16.998i	4.9996 +	14.999i

=====
| LANJUTAN III |
=====

RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN		
Iter	Ke :	
SL23		
1	-45.937 +	20.559i
2	-12.616 +	5.6204i
3	-3.1498 +	2.2215i
4	-0.4105 +	1.5991i
5	0.41439 +	1.5387i
6	0.67422 +	1.562i
7	0.7599 +	1.5832i
8	0.78936 +	1.5945i
9	0.79986 +	1.5997i

Hasil perhitungan aliran daya pada sistem tenaga listrik tiga bus menggunakan metode Gauss-Seidel menunjukkan bahwa setelah sembilan iterasi, tegangan pada masing-masing bus, aliran daya pada setiap saluran, dan rugi-rugi daya pada saluran mencapai konvergensi. Bus 1 yang berfungsi sebagai *slack bus* memiliki daya kompleks (S_1) sebesar $409.48 - 188.99i$ MVA. Aliran daya dari bus 1 ke bus 2 (S_{12}) adalah $199.49 + 83.995i$ MVA, dan sebaliknya (S_{21}) sebesar $-190.99 - 66.996i$ MVA. Aliran daya dari bus 1 ke bus 3 (S_{13}) adalah $209.99 + 104.99i$ MVA, dan sebaliknya (S_{31}) sebesar $-204.99 - 89.996i$ MVA. Aliran daya dari

bus 2 ke bus 3 (S_{23}) adalah $-65.594 - 43.197i$ MVA, dan sebaliknya (S_{32}) sebesar $66.394 + 44.797i$ MVA. Rugi-rugi daya pada saluran antara bus 1 dan bus 2 (SL_{12}) adalah $8.4992 + 16.998i$ MVA, antara bus 1 dan bus 3 (SL_{13}) adalah $4.9996 + 14.999i$ MVA, dan antara bus 2 dan bus 3 (SL_{23}) adalah $0.79986 + 1.5997i$ MVA. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi operasi yang stabil dan semua variabel penting telah dicapai dengan akurasi yang memadai sesuai dengan metode iteratif Gauss-Seidel.

B. Metode Newton-Raphson

Metode Newton Raphson memiliki perhitungan lebih baik daripada metode Gauss-Seidel bila untuk sistem yang besar karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk memperoleh pemecahan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (B.1)$$

Persamaan diatas bila ditulis dalam bentuk polar adalah :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (B.2)$$

Daya kompleks pada bus I adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (B.3)$$

Substitusi dari persamaan (B.2) untuk I_i ke dalam persamaan (B.3) menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_j \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (B.4)$$

Pisahkan bagian real dan imajiner :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.5)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.6)$$

Persamaan (B.5) dan (B.6) membentuk persamaan aljabar nonlinier dengan variable sendiri. Besarnya setiap variable dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam satuan radian.

Persamaan (B.5) dan (B.6) dikembangkan dari deret Taylor seperti persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (B.7)$$

Dalam hal ini bus 1 diumpamakan sebagai slack bus. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya

reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (B.7)$$

Banyaknya elemen Matriks Jacobian dari persamaan (B.7) ditentukan dengan $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ dengan n adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya *Voltage-controlled buses* pada sistem. J_1 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1)$, J_2 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1-m) \times (n-1)$ dan J_4 diperoleh dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$.

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.9)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.10)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (B.12)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{i=1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (B.14)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_4 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ij}| \sin \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (B.16)$$

Harga dari $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (B.17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (B.18)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (B.19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (B.20)$$

Prosedur penyelesaian studi aliran daya dengan metode Newton-Raphson adalah sebagai berikut :

1. Pada bus berbeda dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} harganya ditentukan. Besarnya tegangan dan susut fasa disamakan dengan nilai *slack bus* atau 1,0 dan 0,0 jadi $|V_i^{(0)}| = 1.0$ dan $\delta_i^0 = 0.0$. Untuk *voltage regulated buses* dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} diatur, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut *slack bus*, jadi $\delta_i^{(0)} = 0$.

2. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ pada bus berbeban dengan persamaan (B.5) dan (B.6), dan juga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (B.17) dan (B.18).
3. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ pada *voltage-controlled buses* dengan persamaan (B.5) dan (B.6).
4. Hitung elemen-elemen matriks Jacobian; J_1, J_2, J_3 dan J_4 dengan persamaan (B.9) sampai dengan persamaan (B.16).
5. Hitung harga-harga $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan persamaan (B.8).
6. Hitung harga-harga baru dari sudut fasa dan tegangan; $\delta_i^{(k)}$ dan $|V_i^{(k)}|$ dengan persamaan (B.19) dan (B.20).
7. Prosen ini berlangsung sampai :

$$|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad (B.21)$$

Contoh 16.2:

Sebuah sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bus, dengan data impedansi dan beban sebagai berikut:

Data Impedansi Saluran:

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 2: $z_{12} = 0.02 + j0.04$ pu

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 3: $z_{13} = 0.01 + j0.03$ pu

Impedansi saluran antara bus 2 dan bus 3: $z_{23} = 0.0125 + j0.025$ pu

Data Beban:

Beban pada bus 2: $S_2 = 256.6 + j110.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Beban pada bus 3: $S_3 = 138.6 + j45.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Bus Data:

Bus 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $V_1 = 1.05 + j0.0$ pu

Estimasi awal tegangan pada bus 2 dan bus 3 adalah $V_2 = 1.0 + j0.0$ pu dan $V_3 = 1.0 + j0.0$ pu

Gunakan metode Newton-Raphson untuk menghitung aliran daya pada sistem 3 bus ini. Tentukan tegangan pada masing-masing bus, aliran daya pada setiap saluran, dan rugi-rugi daya pada saluran setelah iterasi konvergen.

Berikut adalah langkah-langkah penyelesaian menggunakan kode MATLAB:

```
clear all
clc
close all
disp('-----')
disp('STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS      ')
disp('DENGAN PENYELESAIAN METODE NEWTON-RHAPSON')
disp('OLEH : RIMBAWATI, ST.,MT                ')
disp('-----')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
```

```

Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut :
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Beban dalam per unit
S2=- (256.6+j*110.2)/100;
S3=- (138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;
disp('
_____')
disp('|      |              |              |')
disp('|      |        DAYA PADA |        ALIRAN DAYA PADA SALURAN |')
disp('| Iter |        SLACK BUS  |              |')
disp('| Ke  : |        (Bus 1)   |              |')
disp('|      |_____')
disp('|      |          S1      |          S12      |          S21      |')
disp('_____')
disp('_____')
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);

```

```

sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
sd6=cos(theta33);
sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
sd8=sin(theta22);
sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
sd12=sin(theta33);
sdd=sin(theta11);
sde=sin(theta12-delta1+delta2);
sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :
P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=- (abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=- (abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Elemen-elemen matriks Jacobian
J(1,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd9);
J(1,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);

J(1,3)=(abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd2)+(ab
s(V3)*abs(Y23)*sd3);
J(1,4)=abs(V2)*abs(Y23)*sd3;
J(2,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11);

J(2,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)+(abs(V3)*abs(V2)*ab
s(Y32)*sd11);
J(2,3)=abs(V3)*abs(Y32)*sd5;

J(2,4)=(abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V2)*abs(Y32)*sd5)+(2*ab
s(V3)*abs(Y33)*sd6);

J(3,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd3);
J(3,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
J(3,3)=- (abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
J(3,4)=- (abs(V2)*abs(Y23)*sd9);
J(4,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd5);

```

```

J(4,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs
(Y32)*sd5);
    J(4,3)=- (abs(V3)*abs(Y32)*sd11);
    J(4,4)=- (abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(2*abs(V3)*abs(Y33)*sd12);

    % Sisa daya (power residual) :
    deltaP2=real(S2)-P2;
    deltaP3=real(S3)-P3;
    deltaQ2=imag(S2)-Q2;
    deltaQ3=imag(S3)-Q3;
    % Sisa daya (power residuals)dalam bentuk matriks
kolom :
    deltaS=[deltaP2;deltaP3;deltaQ2;deltaQ3];
    % Perhitungan harga tegangan dan sudut tegangan pada
bus 2 dan 3 :
    deltaX=J\deltaS;
    delta2=delta2+deltaX(1,1);
    delta3=delta3+deltaX(2,1);
    V2=V2+deltaX(3,1);
    E3=V3+deltaX(4,1);
    % Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
    Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
    Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
    % Arus pada saluran :
    I12=y12*(V1-Vkom2);
    I21=-I12;
    % Konjugat dari arus pada saluran :
    Ik12=conj(I12);
    Ik21=conj(I21);
    % Daya fiktif dan daya reaktif pada bus 1 :

P1=(abs(V1^2)*abs(Y11)*sda)+(abs(V1)*abs(Vkom2)*abs(Y12)*s
db)+(abs(V1)*abs(Vkom3)*abs(Y13)*sdc);
    Q1=- (abs(V1^2)*abs(Y11)*sdd)-
(abs(V1)*abs(Vkom2)*abs(Y12)*sde)-
(abs(V1)*abs(Vkom3)*abs(Y13)*sdf);

    % Daya kompleks pada bus 1 :
    S1=(P1-j*Q1)*100;
    % Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
    S12=V1*Ik12*100;
    S21=Vkom2*Ik21*100;

```

```

        x=abs(E3-V3);
        V3=E3;
        fprintf('%i ',iter),disp([S1,S12,S21]);
end

disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN I |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Beban dalam per unit
S2=- (256.6+j*110.2)/100;
S3=- (138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
v1=1.05+j*0.0

```

```

% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;

disp('_____')
disp('| | | | |')
disp('| | | | | ALIRAN DAYA PADA SALURAN | |')
disp('|Iter | | | | |')
disp('|Ke : | | | | |')
disp('| | | | |')
disp('| | S13 | S31 | S23 | |')
disp('_____')
disp('_____')

format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
    sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
    sd6=cos(theta33);
    sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
    sd8=sin(theta22);
    sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
    sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
    sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
    sd12=sin(theta33);
    sdd=sin(theta11);
    sde=sin(theta12-delta1+delta2);
    sdf=sin(theta13-delta1+delta3);

```

```

% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :

P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
    Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
    Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Elemen-elemen matriks Jacobian

J(1,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd9);
    J(1,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);

J(1,3)=(abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd2)+(ab
s(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(1,4)=abs(V2)*abs(Y23)*sd3;
    J(2,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11);

J(2,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)+(abs(V3)*abs(V2)*ab
s(Y32)*sd11);
    J(2,3)=abs(V3)*abs(Y32)*sd5;

J(2,4)=(abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V2)*abs(Y32)*sd5)+(2*ab
s(V3)*abs(Y33)*sd6);

J(3,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd3);
    J(3,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(3,3)=- (abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
    J(3,4)=- (abs(V2)*abs(Y23)*sd9);
    J(4,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd5);

J(4,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs
(Y32)*sd5);
    J(4,3)=- (abs(V3)*abs(Y32)*sd11);
    J(4,4)=- (abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(2*abs(V3)*abs(Y33)*sd12);

```

```

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Sisa daya (power residuals)dalam bentuk matriks
kolom :
deltaS=[deltaP2;deltaP3;deltaQ2;deltaQ3];
% Perhitungan harga tegangan dan sudut tegangan pada
bus 2 dan 3 :
deltaX=J\deltaS;
delta2=delta2+deltaX(1,1);
delta3=delta3+deltaX(2,1);
V2=V2+deltaX(3,1);
E3=V3+deltaX(4,1);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3 :
Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
% Arus pada saluran :
I13=y13*(V1-Vkom3);
I31=-I13;
I23=y23*(Vkom2-Vkom3);
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik13=conj(I13);
Ik31=conj(I31);
Ik23=conj(I23);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
S13=V1*Ik13*100;
S31=Vkom3*Ik31*100;
S23=Vkom2*Ik23*100;
x=abs(E3-V3);
V3=E3;
fprintf('%i ',iter),disp([S13,S31,S23]);
end
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN II |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;

```

```

% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Beban dalam per unit
S2=-(256.6+j*110.2)/100;
S3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;

```

```

disp('
disp(' | | |
disp(' | ALIRAN DAYA | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN |
disp(' Iter | PADA SALURAN |
disp(' Ke : | (Bus 1) |
disp(' |
disp(' | S32 | SL12 | SL13 |
disp('
disp('

```

```
format short g
```

```
while x>=epsilon
```

```
    iter=iter+1;
```

```
    % Harga cos dan sin dari sudut :
```

```
    sda=cos(theta11);
```

```
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
```

```
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
```

```
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
```

```
    sd2=cos(theta22);
```

```
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
```

```
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
```

```
    sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
```

```
    sd6=cos(theta33);
```

```
    sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
```

```
    sd8=sin(theta22);
```

```
    sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
```

```
    sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
```

```
    sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
```

```
    sd12=sin(theta33);
```

```
    sdd=sin(theta11);
```

```
    sde=sin(theta12-delta1+delta2);
```

```
    sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
```

```
    % Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :
```

```
P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+ (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
```

```
P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
```

```
    Q2=- (abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7) -
```

```
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8) - (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
```

```
    Q3=- (abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10) -
```

```
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11) - (abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);
```

```
% Elemen-elemen matriks Jacobian
```

```
J(1,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd9);
```

```
    J(1,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
```

```

J(1,3)=(abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd2)+(abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(1,4)=abs(V2)*abs(Y23)*sd3;
    J(2,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11);

J(2,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11);
    J(2,3)=abs(V3)*abs(Y32)*sd5;

J(2,4)=(abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V2)*abs(Y32)*sd5)+(2*abs(V3)*abs(Y33)*sd6);

J(3,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(3,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(3,3)=- (abs(V1)*abs(Y21)*sd7) -
(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd8) - (abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
    J(3,4)=- (abs(V2)*abs(Y23)*sd9);
    J(4,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd5);

J(4,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd5);
    J(4,3)=- (abs(V3)*abs(Y32)*sd11);
    J(4,4)=- (abs(V1)*abs(Y31)*sd10) -
(abs(V2)*abs(Y32)*sd11) - (2*abs(V3)*abs(Y33)*sd12);

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Sisa daya (power residuals)dalam bentuk matriks
kolom :
deltaS=[deltaP2;deltaP3;deltaQ2;deltaQ3];
% Perhitungan harga tegangan dan sudut tegangan pada
bus 2 dan 3 :
deltaX=J\deltaS;
delta2=delta2+deltaX(1,1);
delta3=delta3+deltaX(2,1);
V2=V2+deltaX(3,1);
E3=V3+deltaX(4,1);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));

```

```

% Arus pada saluran :
I12=y12*(V1-Vkom2);
I21=-I12;
I13=y13*(V1-Vkom3);
I31=-I13;
I23=y23*(Vkom2-Vkom3);
I32=-I23;
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik12=conj(I12);
Ik21=conj(I21);
Ik13=conj(I13);
Ik31=conj(I31);
Ik23=conj(I23);
Ik32=conj(I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
S12=V1*Ik12*100;
S21=Vkom2*Ik21*100;
S13=V1*Ik13*100;
S31=Vkom3*Ik31*100;
S32=Vkom3*Ik32*100;
% Rugi-rugi daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
SL12=S12+S21;
SL13=S13+S31;
x=abs(E3-V3);
V3=E3;
fprintf('%i ', iter), disp([S32, SL12, SL13])
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN III |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
v23=1/z23;

```

```

% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Beban dalam per unit
S2=- (256.6+j*110.2)/100;
S3=- (138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;
disp('
disp(' | | |
disp(' | | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN | ')
disp(' | Iter| | ')
disp(' | Ke :| | ')
disp(' | | |
disp(' | | SL23 | ')
disp('
disp('
disp('
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;

```

```

% Harga cos dan sin dari sudut :
sda=cos(theta11);
sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
sd2=cos(theta22);
sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
sd6=cos(theta33);
sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
sd8=sin(theta22);
sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
sd12=sin(theta33);
sdd=sin(theta11);
sde=sin(theta12-delta1+delta2);
sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :

P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Elemen-elemen matriks Jacobian

J(1,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd9);
J(1,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);

J(1,3)=(abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd2)+(ab
s(V3)*abs(Y23)*sd3);
J(1,4)=abs(V2)*abs(Y23)*sd3;
J(2,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11);

J(2,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)+(abs(V3)*abs(V2)*ab
s(Y32)*sd11);
J(2,3)=abs(V3)*abs(Y32)*sd5;

```

```

J(2,4)=(abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V2)*abs(Y32)*sd5)+(2*abs
(V3)*abs(Y33)*sd6);

J(3,1)=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2)*abs(V3)*abs
(Y23)*sd3);
    J(3,2)=- (abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);
    J(3,3)=- (abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(2*abs(V2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
    J(3,4)=- (abs(V2)*abs(Y23)*sd9);
    J(4,1)=- (abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd5);

J(4,2)=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs
(Y32)*sd5);
    J(4,3)=- (abs(V3)*abs(Y32)*sd11);
    J(4,4)=- (abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(2*abs(V3)*abs(Y33)*sd12);
    % Sisa daya (power residual) :
    deltaP2=real(S2)-P2;
    deltaP3=real(S3)-P3;
    deltaQ2=imag(S2)-Q2;
    deltaQ3=imag(S3)-Q3;

    % Sisa daya (power residual) :
    deltaP2=real(S2)-P2;
    deltaP3=real(S3)-P3;
    deltaQ2=imag(S2)-Q2;
    deltaQ3=imag(S3)-Q3;
    % Sisa daya (power residuals)dalam bentuk matriks
kolom :
    deltaS=[deltaP2;deltaP3;deltaQ2;deltaQ3];
    % Perhitungan harga tegangan dan sudut tegangan pada
bus 2 dan 3 :
    deltaX=J\deltaS;
    delta2=delta2+deltaX(1,1);
    delta3=delta3+deltaX(2,1);
    V2=V2+deltaX(3,1);
    E3=V3+deltaX(4,1);
    % Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
    Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
    Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
    % Arus pada saluran :
    I23=y23*(Vkom2-Vkom3);
    I32=-I23;
    % Konjugat dari arus pada saluran :

```

```

Ik23=conj(I23);
Ik32=conj(I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
S23=Vkom2*Ik23*100;
S32=Vkom3*Ik32*100;
% Rugi-rugi daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
SL23=S23+S32;
x=abs(E3-V3);
V3=E3;
fprintf('%i ',iter), disp([SL23])
end
disp('_____')

```

Dari program di atas, bila di-run, hasilnya adalah:

```

-----
STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS
DENGAN PENYELESAIAN METODE NEWTON-RHAPSON
OLEH : RIMBAWATI, ST.,MT
-----

```

Iter Ke :	DAYA PADA SLACK BUS (Bus 1)		ALIRAN DAYA PADA SALURAN			
			S1	S12	S21	
1	118.25 -	285.65i	195.72 +	79.585i	-187.62 -	63.389i
2	406.89 -	189.93i	199.49 +	83.989i	-190.99 -	66.991i
3	409.49 -	189i	199.5 +	84i	-191 -	67i

```

=====
| LANJUTAN I |
=====

```

ALIRAN DAYA PADA SALURAN						
Iter						
Ke :						
	S13		S31		S23	
1	207.28 +	99.077i	-202.49 -	84.715i	-63.757 -	42.659i
2	209.99 +	104.99i	-204.99 -	89.987i	-65.593 -	43.199i
3	210 +	105i	-205 -	90i	-65.6 -	43.2i

=====
 | LANJUTAN II |
 =====

ALIRAN DAYA RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN						
Iter	ALIRAN DAYA		RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN			
Ke :	PADA SALURAN					
	(Bus 1)					
	S32		SL12		SL13	
1	64.516 +	44.178i	8.098 +	16.196i	4.7873 +	14.362i
2	66.393 +	44.798i	8.4989 +	16.998i	4.9995 +	14.998i
3	66.4 +	44.8i	8.5 +	17i	5 +	15i

=====
 | LANJUTAN III |
 =====

RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN		
Iter		
Ke :		
	SL23	
1	0.75941 +	1.5188i
2	0.79985 +	1.5997i
3	0.8 +	1.6i

Studi aliran daya pada sistem tiga bus menggunakan metode Newton-Raphson berhasil menentukan tegangan pada masing-masing bus, aliran daya pada setiap saluran, dan rugi-rugi daya pada saluran setelah iterasi konvergen. Hasil iterasi menunjukkan perubahan daya pada *slack bus* (bus 1), aliran daya antara bus, serta rugi-rugi daya di tiap saluran hingga mencapai konvergensi. Pada iterasi ke-3, nilai daya pada *slack bus* adalah $409.49 - 189i$, dengan aliran daya pada saluran S_{12} sebesar $199.5 + 84i$, dan S_{21} sebesar $-191 - 67i$. Aliran daya pada saluran S_{13} adalah $210 + 105i$, dan S_{31} sebesar $-205 - 90i$. Pada saluran S_{23} , aliran daya tercatat $-65.6 - 43.2i$, sedangkan aliran daya S_{32} adalah $66.4 + 44.8i$. Rugi-rugi daya pada saluran SL_{12} adalah $8.5 + 17i$, pada SL_{13} adalah $5 + 15i$, dan pada SL_{23} adalah $0.8 + 1.6i$. Iterasi menunjukkan bahwa hasil konvergen diperoleh setelah tiga iterasi dengan nilai yang stabil, menegaskan keandalan metode Newton-Raphson dalam menghitung aliran daya pada sistem besar secara efisien.

C. Metode *Fast-Decoupled*

Perubahan daya aktif (ΔP) kurang sensitif terhadap perubahan tegangan, tetapi paling sensitif terhadap perubahan sudut fasa ($\Delta\delta$). Sebaliknya, daya reaktif kurang sensitif terhadap perubahan sudut fasa dan sangat bergantung pada perubahan tegangan. Oleh karena itu, elemen matriks Jacobian dapat disederhanakan menjadi matriks nol. Dengan demikian, persamaan (B.8) menjadi:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (C.1)$$

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \quad (C.2)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta |V| \quad (C.3)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa matriks menjadi suatu persamaan yang terdekupl (*decoupled*), yang membutuhkan waktu lebih sedikit dibandingkan dengan menggunakan pemecahan persamaan (B.8). Selain itu, penyederhanaan dapat dilakukan agar tidak terjadi perhitungan ulang untuk J_1 dan J_4 selama iterasi berlangsung. Elemen-elemen diagonal dari J_1 dijelaskan oleh persamaan (B.9), yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j) - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$$

Gantilah suku pertama di atas dengan $-Q_i$ seperti yang diberikan oleh persamaan (B.5), sehingga menjadi:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii}$$

Dengan $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ merupakan bagian imajiner dari elemen-elemen diagonal admitansi matriks bus. B_{ii} merupakan jumlah dari elemen yang masuk ke bus i . Dalam sistem tenaga, $B_{ii} \gg Q_{ii}$, sehingga Q_i dapat diabaikan. Penyederhanaan dapat diperoleh dengan mengabaikan $|V_i|^2 = |V_i|$, sehingga hasilnya:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \quad C.4$$

Pada keadaan operasi normal, $\delta_j - \delta_i$ sedikit lebih kecil. Demikian juga persamaan (B.10) yang mengasumsikan $\theta_{ii} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ii}$, sehingga elemen diagonal luar dari J_1 menjadi:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| B_{ij}$$

Penyederhanaan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menganggap $|V_i| \approx 1$, jadi:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_j| B_{ij} \quad (C.5)$$

Ganti suku kedua dari persamaan di atas dengan $-Q_i$ maka yang diberikan oleh persamaan

Elemen diagonal J_4 dijabarkan dengan persamaan (B.15), yang dapat ditulis sebagai:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \sum_{j \neq i}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Ganti suku kedua dari persamaan di atas dengan $-Q_i$ maka yang diberikan oleh persamaan (B.6) adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = |V_i| |Y_{ii}| \theta_{ii} + Q_i$$

Karena $B_{ii} = Y_{ii} \sin \theta_{ii} \gg Q_i$, Q_i dapat diabaikan dan persamaan (B.15) menjadi:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ij} \quad (C.6)$$

Juga pada persamaan (B.16) diumpamakan $\theta_{ii} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ii}$ jadi

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ij} \quad (C.7)$$

Dengan mengasumsikan persamaan (C.2) dan (C.3) diformulasikan dalam:

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -B' \Delta \delta \quad (C.8)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -B'' \Delta |V| \quad (C.9)$$

Di sini, B' dan B'' adalah bagian imajiner dari matriks Y_{bus} . B' adalah matriks yang baris dan kolomnya disusun mulai dari $(n-1)$, dengan n adalah banyaknya bus pada sistem. B'' adalah suatu nilai yang ditentukan dari baris dan kolomnya dengan $(n-1-m)$, dengan m merupakan banyaknya bus yang dikendalikan tegangan. Oleh karena itu, dalam algoritma aliran daya dengan metode fast decoupled, besar sudut fasa dan tegangan dapat dicari dengan:

$$\Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (C.10)$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (C.11)$$

Pemecahan aliran daya dengan metode fast decoupled membutuhkan lebih banyak iterasi dibandingkan dengan metode Newton-Raphson, tetapi untuk setiap proses iterasi dibutuhkan waktu yang lebih sedikit sehingga pemecahan aliran daya dapat diperoleh dengan cepat.

Contoh 16.3:

Sebuah sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bus, dengan data impedansi dan beban sebagai berikut:

Data Impedansi Saluran:

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 2: $z_{12} = 0.02 + j0.04$ pu

Impedansi saluran antara bus 1 dan bus 3: $z_{13} = 0.01 + j0.03$ pu

Impedansi saluran antara bus 2 dan bus 3: $z_{23} = 0.0125 + j0.025$ pu

Data Beban:

Beban pada bus 2: $S_2 = 256.6 + j110.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Beban pada bus 3: $S_3 = 138.6 + j45.2$ MVA (mengalir menjauhi bus)

Bus Data:

Bus 1 adalah slack bus dengan tegangan $V_1 = 1.05 + j0.0$ pu

Estimasi awal tegangan pada bus 2 dan bus 3 adalah $V_2 = 1.0 + j0.0$ pu dan $V_3 = 1.0 + j0.0$ pu

Gunakan metode Fast-Decoupled untuk menghitung aliran daya pada sistem 3 bus ini. Tentukan tegangan pada masing-masing bus, aliran daya pada setiap saluran, dan rugi-rugi daya pada saluran setelah iterasi konvergen.

Berikut adalah langkah-langkah penyelesaian menggunakan kode MATLAB:

```
clear all
clc
close all
disp('-----')
disp('STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS')
```

```

disp('DENGAN PENYELESAIAN METODE FAST DECOUPLED')
disp('OLEH : RIMBAWATI, ST.,MT')
disp('-----')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut :
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Elemen-elemen matriks suseptansi untuk mengevaluasi
sudut fasa delta 2
% dan delta 3
B1(1,1)=imag(Y22);
B1(1,2)=imag(Y23);
B1(2,1)=imag(Y32);
B1(2,2)=imag(Y33);
% Matriks inver dari B1 :
b1=inv(B1);
% Harga B2 :
B2=imag(Y22);
% Beban dalam per unit :

```

```

S2=- (256.6+j*110.2)/100;
S3=- (138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;

disp('
disp('|
disp('|           DAYA PADA           |           ALIRAN DAYA PADA SALURAN           |
disp('| Iter |           SLACK BUS           |           |
disp('| Ke : |           (Bus 1)           |           |
disp('|
disp('|           S1           |           S12           |           S21           |
disp('
disp('

format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
    sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
    sd6=cos(theta33);
    sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
    sd8=sin(theta22);
    sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
    sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
    sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
    sd12=sin(theta33);
    sdd=sin(theta11);
    sde=sin(theta12-delta1+delta2);
    sdf=sin(theta13-delta1+delta3);

```

```

% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :
P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Perhitungan sudut tegangan pada bus 2 dan 3 :
delta=-b1*[deltaP2/abs(V2);deltaP3/abs(V3)];
delta2=delta+delta(1);
delta3=delta+delta(2);
% Perhitungan harga tegangan pada bus 2 dan 3:
V=-(1/B2)*[deltaQ2/abs(V2);deltaQ3/abs(V3)];
V2=V+V(1);
E3=V3+V(2);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
% Arus pada saluran :
I12=y12*(V1-Vkom2);
I21=-I12;
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik12=conj(I12);
Ik21=conj(I21);
% Daya fiktif dan daya reaktif pada bus 1 :

P1=(abs(V1^2)*abs(Y11)*sda)+(abs(V1)*abs(Vkom2)*abs(Y12)*s
db)+(abs(V1)*abs(Vkom3)*abs(Y13)*sdc);
Q1=-(abs(V1^2)*abs(Y11)*sdd)-
(abs(V1)*abs(Vkom2)*abs(Y12)*sde)-
(abs(V1)*abs(Vkom3)*abs(Y13)*sdf);

% Daya kompleks pada bus 1 :
S1=(P1-j*Q1)*100;

```

```

    % Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
    S12=V1*Ik12*100;
    S21=Vkom2*Ik21*100;
    x=abs(E3-V3);
    V3=E3;
    fprintf('%i ',iter),disp([S1,S12,S21]);
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp(' | LANJUTAN I |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut :
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));

```

```

% Elemen-elemen matriks suseptansi untuk mengevaluasi
sudut fasa delta 2
% dan delta 3
B1(1,1)=imag(Y22);
B1(1,2)=imag(Y23);
B1(2,1)=imag(Y32);
B1(2,2)=imag(Y33);
% Matriks inver dari B1 :
b1=inv(B1);
% Harga B2 :
B2=imag(Y22);
% Beban dalam per unit :
S2=-(256.6+j*110.2)/100;
S3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;
disp('
disp('|
disp('|
disp('|Iter
disp('|Ke :
disp('|
disp('|
disp('|
disp('|
disp('
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);

```

```

sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
sd6=cos(theta33);
sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
sd8=sin(theta22);
sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
sd12=sin(theta33);
sdd=sin(theta11);
sde=sin(theta12-delta1+delta2);
sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :

P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Perhitungan sudut tegangan pada bus 2 dan 3 :
delta=-b1*[deltaP2/abs(V2);deltaP3/abs(V3)];
delta2=delta2+delta(1);
delta3=delta3+delta(2);
% Perhitungan harga tegangan pada bus 2 dan 3:
V=- (1/B2) * [deltaQ2/abs(V2);deltaQ3/abs(V3)];
V2=V2+V(1);
E3=V3+V(2);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
% Arus pada saluran :
I13=y13*(V1-Vkom3);
I31=-I13;
I23=y23*(Vkom2-Vkom3);
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik13=conj(I13);

```

```

    Ik31=conj(I31);
    Ik23=conj(I23);
    % Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
    S13=V1*Ik13*100;
    S31=Vkom3*Ik31*100;
    S23=Vkom2*Ik23*100;
    x=abs(E3-V3);
    V3=E3;
    fprintf('%i ',iter),disp([S13,S31,S23]);
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN II |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;
Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut :
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));

```

```

theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Elemen-elemen matriks suseptansi untuk mengevaluasi
sudut fasa delta 2
% dan delta 3
B1(1,1)=imag(Y22);
B1(1,2)=imag(Y23);
B1(2,1)=imag(Y32);
B1(2,2)=imag(Y33);
% Matriks inver dari B1 :
b1=inv(B1);
% Harga B2 :
B2=imag(Y22);
% Beban dalam per unit :
S2=-(256.6+j*110.2)/100;
S3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;

disp('_____')
disp('|          |          |          |          |')
disp('| ALIRAN DAYA | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN |')
disp('| Iter | PADA SALURAN |')
disp('| Ke : | (Bus 1) |')
disp('|_____')
disp('| S32 | SL12 | SL13 |')
disp('_____')
disp('_____')

format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);

```

```

sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
sd6=cos(theta33);
sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
sd8=sin(theta22);
sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
sd12=sin(theta33);
sdd=sin(theta11);
sde=sin(theta12-delta1+delta2);
sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
% Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :

P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Perhitungan sudut tegangan pada bus 2 dan 3 :
delta=-b1*[deltaP2/abs(V2);deltaP3/abs(V3)];
delta2=delta2+delta(1);
delta3=delta3+delta(2);

% Perhitungan harga tegangan pada bus 2 dan 3:
V=-(1/B2)*[deltaQ2/abs(V2);deltaQ3/abs(V3)];
V2=V2+V(1);
E3=V3+V(2);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
Vkom2=abs(V2)*(cos(delta2)+j*sin(delta2));
Vkom3=abs(E3)*(cos(delta3)+j*sin(delta3));
% Arus pada saluran :
I12=y12*(V1-Vkom2);
I21=-I12;
I13=y13*(V1-Vkom3);

```

```

I31=-I13;
I23=y23*(Vkom2-Vkom3);
I32=-I23;
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik12=conj(I12);
Ik21=conj(I21);
Ik13=conj(I13);
Ik31=conj(I31);
Ik32=conj(I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
S12=V1*Ik12*100;
S21=Vkom2*Ik21*100;
S13=V1*Ik13*100;
S31=Vkom3*Ik31*100;
S32=Vkom3*Ik32*100;
% Rugi-rugi dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
SL12=S12+S21;
SL13=S13+S31;
x=abs(E3-V3);
V3=E3;
fprintf('%i ',iter),disp([S32,SL12,SL13]);
end
disp('_____')
disp('_____')
disp('=====')
disp('| LANJUTAN III |')
disp('=====')
% Dasar 100 MVA
epsilon=0.00001;
x=1;
% Data impedansi pada saluran :
z12=0.02+j*0.04;
z13=0.01+j*0.03;
z23=0.0125+j*0.025;
% Admitansi pada saluran :
y12=1/z12;
y13=1/z13;
y23=1/z23;
% Admitansi Ybus :
Y11=y12+y13;
Y12=-y12;
Y13=-y13;
Y21=Y12;

```

```

Y22=y12+y23;
Y23=-y23;
Y31=-y13;
Y32=-y23;
Y33=y13+y23;
% Pembentukan sudut :
theta11=atan2(imag(Y11),real(Y11));
theta12=atan2(imag(Y12),real(Y12));
theta13=atan2(imag(Y13),real(Y13));
theta21=atan2(imag(Y21),real(Y21));
theta22=atan2(imag(Y22),real(Y22));
theta23=atan2(imag(Y23),real(Y23));
theta31=atan2(imag(Y31),real(Y31));
theta32=atan2(imag(Y32),real(Y32));
theta33=atan2(imag(Y33),real(Y33));
% Elemen-elemen matriks suseptansi untuk mengevaluasi
sudut fasa delta 2
% dan delta 3
B1(1,1)=imag(Y22);
B1(1,2)=imag(Y23);
B1(2,1)=imag(Y32);
B1(2,2)=imag(Y33);
% Matriks inver dari B1 :
b1=inv(B1);
% Harga B2 :
B2=imag(Y22);
% Beban dalam per unit :
S2=-(256.6+j*110.2)/100;
S3=-(138.6+j*45.2)/100;
% Bus 1 sebagai slack bus dengan :
V1=1.05+j*0.0;
% Estimasi tegangan awal untuk :
V2=1.0+j*0.0;
V3=1.0+j*0.0;
% Harga delta1 :
delta1=0;
% Estimasi delta awal untuk :
delta2=0;
delta3=0;
iter=0;
disp('
disp(' | _____ | ')
disp(' |           | RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN | ')
disp(' | Iter|           | ')
disp(' | Ke :|           | ')
disp(' | _____ | ')

```

```

disp(' |           |           SL23           |')
disp('-----')
disp('')
format short g
while x>=epsilon
    iter=iter+1;
    % Harga cos dan sin dari sudut :
    sda=cos(theta11);
    sdb=cos(theta12-delta1+delta2);
    sdc=cos(theta13-delta1+delta3);
    sd1=cos(theta21-delta2+delta1);
    sd2=cos(theta22);
    sd3=cos(theta23-delta2+delta3);
    sd4=cos(theta31-delta3+delta1);
    sd5=cos(theta32-delta3+delta2);
    sd6=cos(theta33);
    sd7=sin(theta21-delta2+delta1);
    sd8=sin(theta22);
    sd9=sin(theta23-delta2+delta3);
    sd10=sin(theta31-delta3+delta1);
    sd11=sin(theta32-delta3+delta2);
    sd12=sin(theta33);
    sdd=sin(theta11);
    sde=sin(theta12-delta1+delta2);
    sdf=sin(theta13-delta1+delta3);
    % Harga daya aktif dan daya reaktif pada bus 2 dan 3 :

P2=(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd1)+(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd2)
+(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd3);

P3=(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd4)+(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)
)*sd5)+(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd6);
Q2=-(abs(V2)*abs(V1)*abs(Y21)*sd7)-
(abs(V2^2)*abs(Y22)*sd8)-(abs(V2)*abs(V3)*abs(Y23)*sd9);
Q3=-(abs(V3)*abs(V1)*abs(Y31)*sd10)-
(abs(V3)*abs(V2)*abs(Y32)*sd11)-(abs(V3^2)*abs(Y33)*sd12);

% Sisa daya (power residual) :
deltaP2=real(S2)-P2;
deltaP3=real(S3)-P3;
deltaQ2=imag(S2)-Q2;
deltaQ3=imag(S3)-Q3;
% Perhitungan sudut tegangan pada bus 2 dan 3 :
delta=-b1*[deltaP2/abs(V2);deltaP3/abs(V3)];
delta2=delta2+delta(1);
delta3=delta3+delta(2);

```

```

% Perhitungan harga tegangan pada bus 2 dan 3:
V=- (1/B2) * [deltaQ2/abs (V2);deltaQ3/abs (V3)];
V2=V2+V (1);
E3=V3+V (2);
% Tegangan dalam bentuk bilangan kompleks pada bus 2
dan 3:
Vkom2=abs (V2) * (cos (delta2)+j*sin (delta2));
Vkom3=abs (E3) * (cos (delta3)+j*sin (delta3));
% Arus pada saluran :
I23=y23* (Vkom2-Vkom3);
I32=-I23;
% Konjugat dari arus pada saluran :
Ik23=conj (I23);
Ik32=conj (I32);
% Aliran daya dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
S23=Vkom2*Ik23*100;
S32=Vkom3*Ik32*100;
% Rugi-rugi dalam bentuk bilangan kompleks pada
saluran :
SL23=S23+S32;
x=abs (E3-V3);
V3=E3;
fprintf ('%i ', iter), disp ([SL23]);
end
disp (' _____ ')

```

Dari program di atas, bila di-run, hasilnya adalah:

 STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM 3 BUS
 DENGAN PENYELESAIAN METODE FAST DECOUPLED
 OLEH : RIMBAWATI, ST.,MT

Iter Ke :	DAYA PADA SLACK BUS (Bus 1)		ALIRAN DAYA PADA SALURAN			
	S1		S12		S21	
1	85.898 -	203.131	206.12 +	39.9591	-198.13 -	23.9651
2	419.96 -	135.841	203.75 +	64.9851	-195.45 -	48.3921
3	433.86 -	166.191	199.03 +	71.7941	-190.91 -	55.5521
4	420.13 -	177.61	203.24 +	81.2511	-194.54 -	63.871
5	413.32 -	185.331	199.28 +	83.6561	-190.81 -	66.7091
6	411.3 -	188.411	199.08 +	82.8981	-190.64 -	66.0251
7	409.88 -	188.221	200.16 +	84.1051	-191.61 -	67.0021
8	409.61 -	188.911	199.29 +	84.0761	-190.8 -	67.1021
9	409.63 -	189.071	199.43 +	83.8221	-190.94 -	66.8421
10	409.48 -	188.891	199.64 +	84.0691	-191.13 -	67.0451
11	409.5 -	189.021	199.43 +	84.011	-190.94 -	67.0191
12	409.52 -	189.021	199.5 +	83.9651	-191 -	66.9671

=====
 | LANJUTAN I |
 =====

Iter Ke :	ALIRAN DAYA PADA SALURAN					
	S13		S31		S23	
1	196.52 +	43.5951	-192.85 -	32.5681	-100.53 -	37.21

2	221.29 +	71.007i	-216.39 -	56.31i	-66.466 -	52.081i
3	218.07 +	99.936i	-212.85 -	84.278i	-56.846 -	32.036i
4	208.48 +	98.659i	-203.66 -	84.183i	-73.974 -	44.877i
5	211.63 +	102.96i	-206.61 -	87.887i	-63.998 -	45.179i
6	210.75 +	105.9i	-205.71 -	90.767i	-63.934 -	40.835i
7	209.32 +	104.16i	-204.36 -	89.283i	-67.485 -	44i
8	210.35 +	104.93i	-205.34 -	89.895i	-64.941 -	43.485i
9	210.06 +	105.26i	-205.05 -	90.237i	-65.369 -	42.688i
10	209.84 +	104.81i	-204.85 -	89.839i	-66.013 -	43.448i
11	210.09 +	105.02i	-205.09 -	90.013i	-65.399 -	43.217i
12	210 +	105.05i	-204.99 -	90.048i	-65.587 -	43.095i

=====
 | LANJUTAN II |

Iter Ke :	ALIRAN DAYA		RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN			
	PADA SALURAN (Bus 1)		SL12		SL13	
	S32					
1	101.97 +	40.084i	7.997 +	15.994i	3.6755 +	11.026i
2	67.378 +	53.905i	8.2967 +	16.593i	4.8989 +	14.697i
3	57.393 +	33.13i	8.1212 +	16.242i	5.2191 +	15.657i
4	74.944 +	46.816i	8.6905 +	17.381i	4.8252 +	14.476i
5	64.794 +	46.77i	8.4737 +	16.947i	5.0238 +	15.071i
6	64.68 +	42.326i	8.4363 +	16.873i	5.046 +	15.138i
7	68.327 +	45.684i	8.5513 +	17.103i	4.9582 +	14.875i
8	65.734 +	45.07i	8.487 +	16.974i	5.0119 +	15.036i
9	66.159 +	44.268i	8.4896 +	16.979i	5.0073 +	15.022i

10	66.822 +	45.068i	8.5121 +	17.024i	4.9904 +	14.971i
11	66.195 +	44.811i	8.4954 +	16.991i	5.004 +	15.012i
12	66.386 +	44.692i	8.4987 +	16.997i	5.0008 +	15.002i

=====
 | LANJUTAN III |
 =====

	RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN	
	Iter	
	Ke :	

	SL23	

1	1.4419 +	2.8837i
2	0.91196 +	1.8239i
3	0.54668 +	1.0934i
4	0.96981 +	1.9396i
5	0.79549 +	1.591i
6	0.74549 +	1.491i
7	0.84184 +	1.6837i
8	0.79205 +	1.5841i
9	0.79024 +	1.5805i
10	0.80991 +	1.6198i
11	0.79675 +	1.5935i
12	0.79858 +	1.5972i

Pada contoh soal di atas, aliran daya pada sistem tenaga listrik tiga bus dihitung menggunakan metode Fast-Decoupled. Metode ini memisahkan perhitungan perubahan daya aktif ΔP

yang lebih sensitif terhadap perubahan sudut fase $\Delta\delta$ dari perhitungan perubahan daya reaktif ΔQ yang lebih sensitif terhadap perubahan besarnya tegangan $\Delta|V|$. Dengan data impedansi saluran, beban, dan estimasi awal tegangan yang diberikan, iterasi dilakukan hingga mencapai konvergensi. Hasil iterasi menunjukkan perubahan daya pada bus slack (bus 1) dan aliran daya pada setiap saluran, serta rugi-rugi daya pada saluran. Iterasi konvergen setelah 12 langkah, dengan tegangan bus 1 tetap pada $1.05 + j0.0$ pu, sementara tegangan bus 2 dan bus 3 dihitung untuk masing-masing iterasi hingga mendekati nilai yang stabil. Aliran daya pada saluran juga dihitung, dengan hasil akhir menunjukkan aliran daya dari bus 1 ke bus 2, bus 1 ke bus 3, dan bus 2 ke bus 3. Selain itu, rugi-rugi daya pada setiap saluran juga dihitung, menunjukkan kerugian daya pada saluran 1-2, 1-3, dan 2-3 selama proses iterasi. Interpretasi ini menunjukkan efisiensi metode Fast-Decoupled dalam menyelesaikan masalah aliran daya dengan iterasi yang lebih banyak dibandingkan metode Newton-Raphson, tetapi dengan waktu per iterasi yang lebih sedikit.

Latihan

1. Diberikan contoh sistem tenaga tiga bus di mana bus 1 adalah bus slack dengan tegangan $V_1 = 1\angle 0^\circ$ pu, bus 2 adalah bus PQ dengan beban $P_2 = 1$ pu dan $Q_2 = 0.5$ pu, dan bus 3 adalah bus PV dengan tegangan $|V_3| = 1.05$ pu dan $P_3 = 1.2$ pu. Gunakan metode Newton-Raphson untuk menghitung tegangan pada bus 2 dan bus 3 setelah dua iterasi. Asumsikan Y-bus sudah diberikan.

2. Diberikan sebuah sistem tenaga dengan empat bus: bus 1 adalah slack bus, bus 2 dan bus 3 adalah PQ bus, dan bus 4 adalah PV bus. Beban dan generator pada setiap bus adalah sebagai berikut: $P_2 = 1.5$ pu, $Q_2 = 0.5$ pu, $P_3 = 2$, $Q_3 = 1$ pu, $P_4 = 1$ pu, dan $|V_4| = 1.02$ pu. Hitung tegangan pada bus 2, bus 3, dan bus 4 setelah dua iterasi metode Newton-Raphson. Asumsikan Y -bus sudah diberikan.
3. Sebuah sistem tenaga dengan tiga bus, bus 1 adalah *bus slack*, bus 2 adalah bus PQ dengan beban $P_2 = 0.6$ pu dan $Q_2 = 0.3$ pu, bus 3 adalah bus PV dengan tegangan $|V_3| = 1.03$ pu dan $P_3 = 0.8$ pu. Lakukan dua iterasi metode Newton-Raphson untuk menghitung tegangan pada bus 2 dan bus 3. Asumsikan Y -bus sudah diberikan.
4. Dalam sebuah sistem tenaga empat bus, bus 1 adalah slack bus, bus 2 dan bus 3 adalah PQ bus, dan bus 4 adalah PV bus. Beban pada setiap bus adalah sebagai berikut: $P_2 = 0.5$ pu, $Q_2 = 0.2$ pu, $P_3 = 1$ pu, $Q_3 = 0.5$ pu, $P_4 = 1.2$ pu, dan $|V_4| = 1.04$ pu. Gunakan metode Fast-Decoupled untuk menghitung tegangan pada bus 2, bus 3, dan bus 4 setelah dua iterasi. Asumsikan Y -bus sudah diberikan.
5. Analisis aliran daya pada sistem tenaga lima bus di mana bus 1 adalah bus slack, bus 2 dan bus 3 adalah PQ bus, bus 4 dan bus 5 adalah PV bus. Beban dan generator pada setiap bus adalah sebagai berikut: $P_2 = 0.7$ pu, $Q_2 = 0.4$ pu, $P_3 = 1$ pu, $Q_3 = 0.5$ pu, $P_4 = 0.8$ pu, $|V_4| = 1.02$ pu, $P_5 = 1$ pu, dan $|V_5| = 1.03$ pu. Gunakan metode Newton-Raphson untuk menghitung tegangan pada bus 2, bus 3, bus 4, dan bus 5 setelah dua iterasi. Asumsikan Y -bus sudah diberikan.

BAB XVI

GANGGUAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Fault dalam sebuah jaringan adalah gangguan terhadap aliran daya (beban) sehingga sistem keluar dari kondisi normal. Pada umumnya, *fault* yang terjadi pada jaringan transmisi disebabkan oleh percikan bunga api yang merupakan akibat dari *flash over* (lewat denyar) pada isolasi jaringan. Beda tegangan yang tinggi antara konduktor dan *ground* menyebabkan ionisasi pada udara di sekitarnya, sehingga muatan akan lebih mudah mengalir dari konduktor menuju *ground*. Jika alur yang terbentuk oleh ionisasi disertai dengan rendahnya impedansi *line to ground*, maka terjadi aliran arus (daya) dari konduktor menuju *ground*. *Line to line fault* yang tidak melibatkan *ground* sangat jarang terjadi. Pembukaan *circuit breaker* (pemutus daya) di antara kedua ujung titik *fault* mengakibatkan terjadinya deionisasi sehingga setelah beberapa periode (20 cycle) *circuit breaker* dapat ditutup kembali dan gangguan dapat diatasi.

Pengalaman menunjukkan bahwa di antara *fault* yang terjadi, 70-80% adalah *single line to ground fault*, 5% adalah *symmetrical three-phase faults*, dan sisanya adalah *line to line fault* dan *double line to ground fault*. Dalam bab ini, kita akan mempelajari secara khusus *symmetrical fault* (*fault* 3-fasa).

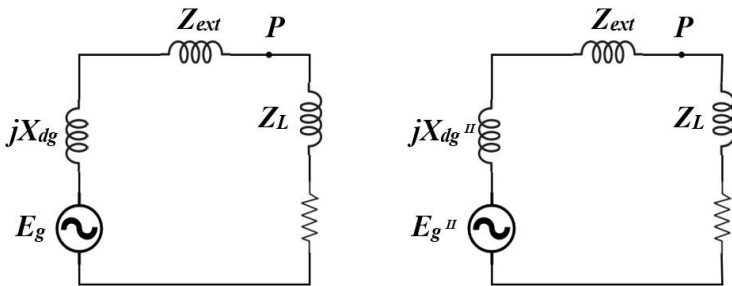
A. Gejala Transien dalam Rangkaian *RL* Seri

Dalam permodelan suatu jaringan transmisi kita konsiderasikan bahwa impedansi hanya terdiri dari komponen resistif R dan komponen induktif L , sedangkan

komponen kapasitif dalam hal ini kita abaikan untuk penyederhanaan masalah. Setelah *fault* terjadi, periode *subtransien*, transien, dan *steady state* dicirikan oleh reaktansi subtransien X_d'' , reaktansi transien X_d' , dan reaktansi *steady state* X_d . Di mana nilai $X_d'' < X_d' < X_d$ sedangkan komponen dari arus hubung singkat memiliki magnitudo $I'' > I' > I$. Dalam pekerjaan analisis tegangan dalam mesin (generator atau motor) dan arus *subtransien*, *transien*, *steady state* dapat diekspresikan dalam *phasor*. Tegangan yang diinduksikan pada kumpulan jankar beberapa saat setelah *fault* terjadi berbeda dengan tegangan saat dicapai kondisi *steady state* (tunak). Kita perhitungkan perbedaan tegangan induksi dengan menggunakan nilai reaktansi yang berbeda (X_d'' , X_d' , X_d) yang diserikan dengan tegangan dalam untuk menghitung arus *subtransien*, *transien*, dan *steady state*, atau dengan kata lain besar tegangan dalam dianggap tetap dalam beberapa periode setelah terjadinya *fault*.

B. Tegangan dalam Mesin Berbeban pada Kondisi *Fault*

Marilah kita misalkan suatu generator dibebani saat terjadi *fault*. Gambar 16.1 adalah rangkaian ekuivalen generator dengan beban tiga fasa yang seimbang. Tegangan dalam generator ditunjukkan dengan subskrip g , dan impedansi eksternal yang mewakili impedansi hubung singkat ditunjukkan di antara terminal generator dan titik *fault* P . Arus yang mengalir sebelum terjadi *fault* adalah I_L , tegangan pada titik *fault* adalah V_f , dan tegangan terminal adalah V_t .



Gambar 16.1 (a) Rangkaian ekivalen generator beban tiga fase seimbang *steady state* (b) Rangkaian ekivalen untuk kondisi subtransien

Jika kita ingin menghitung arus setelah terjadi fault di titik P , untuk arus subtransien I'' kita gunakan reaktansi X_d'' , sedangkan untuk arus I' kita gunakan reaktansi X_d' . Dengan melihat rangkaian pada Gambar 16.1.b, kita bisa menghitung tegangan dalam generator pada kondisi subtransien (E_g'') sebagai berikut:

$$E_g'' = V_t + jX_{dg}'' IL$$

$$E_g'' = (V_f + Z_{ext}IL) + jX_{dg}IL$$

$$E_g'' = V_f + (Z_{ext} + jX_{dg}'')IL \quad (16.1)$$

Dengan cara yang sama, kita dapat menentukan tegangan internal pada kondisi transien E_g' :

$$E_g' = V_t + jX_{dg}' IL = V_t + (Z_{ext} + jX_{dg}')IL \quad (16.2)$$

Dari persamaan (16.1) dan (16.2), dapat dilihat bahwa nilai tegangan internal subtransien dan transien (Eg'' & Eg') akan sama dengan tegangan internal (Eg) jika generator dalam keadaan beban nol (terminal generator terbuka). Selain itu, dapat disimpulkan bahwa harga Eg'' yang disertakan dengan Xdg'' merepresentasikan generator sesaat sebelum dan sesudah terjadinya *fault* jika arus sebelum *fault* dalam generator memiliki besar yang sesuai dengan IL , sedangkan Eg yang disertakan dengan reaktansi sinkron Xdg merepresentasikan rangkaian ekuivalen generator dalam kondisi *steady state* untuk sembarang nilai arus beban. Motor sinkron memiliki reaktansi yang sejenis dengan generator. Saat motor dihubung-singkat (rotor diblok), aliran daya dari jaringan terhenti, namun fluks tetap dihasilkan dan rotor tetap berputar dalam waktu singkat. Dengan menggantikan tegangan internal generator (Eg'' dan Eg') dengan tegangan internal motor *subtransien* dan transien (Em'' & Em'), dapat diperoleh persamaan:

$$Em'' = Vt - jXd m'' IL \quad (16.3)$$

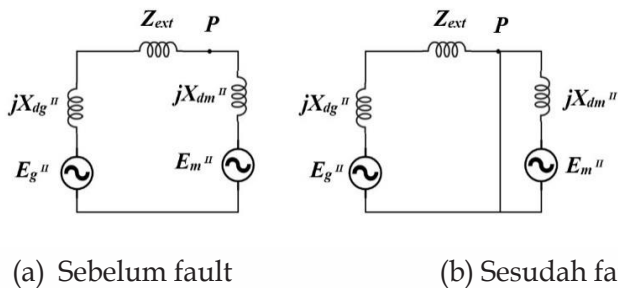
$$Em' = Vt - jXd m' IL \quad (16.4)$$

Di mana Vt adalah tegangan terminal motor. Arus hubung singkat dalam suatu sistem yang terdiri dari generator dan motor berbeban dapat ditentukan dengan cara:

1. Menghitung tegangan internal mesin baik subtransien maupun transien.
2. Menggunakan Teorema Thevenin. Sebagai contoh, sebuah generator sinkron dihubungkan dengan motor sinkron melalui impedansi eksternal $Zext$. Motor

menerima arus beban IL dari generator saat terjadi hubung singkat tiga fasa pada terminal motor. Gambar 16.2 menunjukkan rangkaian ekuivalen dan aliran arus sesaat sebelum dan sesudah terjadinya *fault*. Dengan mengganti reaktansi sinkron dari motor dan generator dengan reaktansi subtransien, kita bisa menghitung tegangan internal subtransien mesin dan mensubstitusi nilai V_f dan IL dalam persamaan:

$$E_g'' = V_f + (Z_{ext} + jX_{dg}'')IL \quad (16.5)$$



Gambar 16.2 Rangkaian ekuivalen dan aliran arus sebelum dan sesudah terjadinya fault

$$E_m'' = V_f - jX_{dm}'' IL \quad (16.6)$$

Saat terjadi hubung singkat di sistem (Gambar 16.2), arus *subtransien* (I_g'') yang keluar dari generator dan arus (I_m'') yang keluar dari motor bisa ditentukan dari persamaan:

$$I_g = \frac{E_g''}{Z_{ext} + jX_{dg}''} = \frac{V_f}{Z_{ext} + jX_{dg}''} + I_L \quad (16.7)$$

Sedangkan besar arus hubung singkat tiga fasa adalah jumlah dari arus I_g'' dan I_m'' seperti digambarkan pada Gambar 16.2.b, sehingga besar arus hubung singkat tiga fasa adalah:

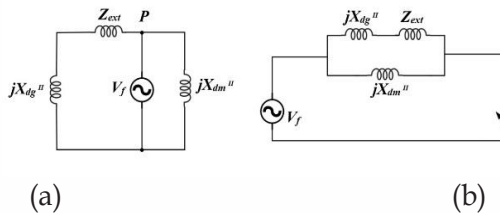
$$I_m = \frac{E_m}{jXd_m''} = \frac{Vf}{jXd_m''} - I_L \quad (16.8)$$

$$I_m = \frac{E_m}{jXd_m''} = \frac{Vf}{jXd_m''} - I_L \quad (16.9)$$

Di mana I_g'' dan I_m'' merupakan kontribusi generator dan motor pada arus hubung singkat. Pendekatan lain adalah dengan teorema Thevenin yang didasarkan pada persamaan 1.9 dan harus diketahui besar Vf (tegangan sebelum *fault*) pada titik *fault*), serta parameter mesin seperti reaktansi subtransien. Impedansi Theveninnya X_{dm}'' paralel dengan Z_{ext} ditambah dengan X_{dg}'' :

$$Z_{th} = jX_{dm}'' (Z_{ext} + jX_{dg}'') / (Z_{ext} + j(X_{dg}'' + X_{dm}'')) \quad (16.10)$$

Dengan mensimulasikan hubung singkat dengan menutup saklar S , maka arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung sesuai dengan persamaan di atas.



Gambar 16.3 (a) Penerapan tegangan Vf untuk mensimulasikan *fault* (b) Rangkaian ekivalen Thevenin dilihat dari titik P

C. Perhitungan Sudut Pemutus Kritis dengan Metode Runge-Kutta Orde 4

Dalam analisis stabilitas sistem tenaga listrik, Anda diminta untuk menghitung sudut pemutus kritis menggunakan metode Runge-Kutta orde 4. Sistem yang dipertimbangkan memiliki parameter sebagai berikut: $H = 4.37$, frekuensi dasar $f_0 = 50$ Hz, reaktansi-d $X_d = 0.125$, reaktansi-transien $X_T = 0.021$, dan dua reaktansi saluran $X_{L1} = 0.40$ dan $X_{L2} = 0.40$. Sumber daya sistem berupa daya $S = 1 + j0.2$, dengan tegangan $V = 1 + j0$ dan frekuensi sudut awal $\omega = 0$. Pertama-tama, hitung arus yang mengalir ke bus tak hingga dan reaktansi transfer antara tegangan terminal dan bus tak hingga sebelum gangguan. Kemudian, tentukan tegangan internal transien, sudut kerja awal, dan ayunan sudut maksimum. Hitung sudut pemutus kritis berdasarkan perhitungan tersebut. Selanjutnya, simulasikan pergerakan sudut delta dan omega selama gangguan dan setelah gangguan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4. Tampilkan grafik ayunan sudut delta terhadap waktu, serta hasil perhitungan sudut pemutus kritis dan waktu pemutusan. Tanyakan kepada pengguna waktu pemutusan dalam detik, dan kemudian gunakan metode numerik untuk menghitung delta dan omega selama dan setelah gangguan.

Penyelesaian dengan MATLAB adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc
close all
format short g
delta_t=0.01;
% Input data pada sistem
```

```

H=4.37;
fo=50;
Xd=0.125;
XT=0.021;
XL1=0.40;
XL2=0.40;
S=1+j*0.2;
V=1+j*0;
omega=0;
Pm=real(S);
% Perhitungan Awal
% Arus Mengalir ke Infinite Bus
I=conj(S)/conj(V);
% Reaktansi Transfer Sebelum Gangguan
X1=Xd+XT+(XL1*XL2)/(XL1+XL2);
% Reaktansi Transfer Sebelum Gangguan
X2=1.424;
X3=0.5673;
% Harga r1 dan r2
zr1=X1/X2;
r2=X1/X3;
% Tegangan Internal Transient
e=V+j*X1*I;
E=abs(e);
% Sudut Kerja Awal
Pmak=E*V/X1;
delta0=180/pi*asin(real(S)/Pmak);
% Ayunan Sudut Maksimum
Pe2mak=r2*E*V/X1;
deltamak=180-180/pi*asin(real(S)/Pe2mak);
% Konversi Sudut ke Radian
delta0r=delta0*pi/180;
deltamakr=deltamak*pi/180;
% Sudut Pemutus Kritis
deltak=180/pi*acos((real(S)/Pmak*...
    (deltamakr-delta0r)+r2*...
    cos(deltamak*pi/180)-r1*...
    cos(delta0*pi/180))/(r2-r1));
% Konversi Sudut Pemutus Kritis ke Radian
deltakr=deltak*pi/180;
% Output Hasil Perhitungan

```

```

disp('-----')
disp('HASIL PERHITUNGAN SUDUT PEMUTUS KRITIS           ')
disp('DENGAN METODE RUNGE KUTTA ORDE 4                 ')
disp('RIMBAWATI, ST.,MT                               ')
disp('-----')
disp(['Arus yang mengalir ke Infinite Bus = ',num2str(I),' A  ] )
disp(['Tegangan Internal Transient      = ',num2str(E),' V  ] )
disp(['Sudut Kerja Awal                  = ',num2str(delta0) ] )
disp(['Sudut Pemutus Kritis              = ',num2str(deltak) ] )
disp(['Ayunan Sudut Maksimum             = ',num2str(deltamak)] )
disp('-----')
% Plotting Kurva Ayunan
delta1=0:0.05:180;
Pe=Pmak*sin(delta1*pi/180);
Pe1=r1*Pe;
Pe2=r2*Pe;
delta2=0:0.05:deltamak;
P1=0:0.001:real(S);
P2=0:0.001:r2*Pmak*sin(deltak*pi/180);
figure;
plot(delta1,Pe,delta1,Pe2,...
      delta1,Pe1,delta2,real(S),...
      delta0,P1,deltak,P2,deltamak,P1)
xlabel('Sudut Daya, Derajat')
ylabel('Pe, Per Unit')
title('Kurva Ayunan Metode Runge-Kutta Orde 4')
text(delta0,0.02,'/')
text(21.1,0.08,'/')
text(30,0.18,['Sudut Kerja Awal = ',...
             num2str(delta0),' derajat'])
text(deltak,0.02,'/')
text(102,0.08,'/')
text(89,0.30,['Sudut Pemutus Kritis = ',...
             num2str(deltak),' derajat'])
text(150.2,-0.09,'/')
text(deltamak,-0.09,'|')
text(deltamak,-0.11,'|')
text(122,-0.25,['Ayunan Sudut Maksimum = ',...
             num2str(deltamak),' derajat'])
% Penanda Garis A1 dan A2
text(52,0.8,'A1');
for deltaA1=delta0:0.9:deltak
    for A1=r1*Pmak*sin(deltaA1*pi/180):0.035:real(S)
        text(deltaA1,A1,'-')
    end
end
end

```

```

text(120,1.35,'A2')
for deltaA2=deltak:1:deltamak
    for A2=real(S):0.035:r2*Pmak*sin(deltaA2*pi/180)
        text(deltaA2,A2,'-')
    end
end
disp('-----')
disp('HARGA DELTA DAN OMEGA MELALUI ')
disp('PENYELESAIAN SECARA NUMERIK ')
disp('DENGAN METODE Runge-Kutta Orde 4')
disp('-----')
disp('==   WAKTU       !   DELTA       !   OMEGA       ')
disp('==   (Detik)     ! (Derajat)     ! (radian/detik)')
disp('-----')
tp=input('Waktu Pemutusan (detik) = ');
disp('-----')
% Harga Delta dan Omega selama Gangguan
figure
for t=0:delta_t:(tp-delta_t)
    K1=omega*delta_t;
    L1=((pi*fo/H)*(Pm-
r1*Pmak*sin(delta0*pi/180)))*delta_t;
    K2=(omega+0.5*L1)*delta_t;
    L2=((pi*fo/H)*(Pm-r1*Pmak*...
        sin((delta0+(0.5*K1*180/pi))*pi/180)))*delta_t;
    K3=(omega+0.5*L2)*delta_t;
    L3=((pi*fo/H)*(Pm-r1*Pmak*...
        sin((delta0+(0.5*K2*180/pi))*pi/180)))*delta_t;
    K4=(omega+L3)*delta_t;
    L4=((pi*fo/H)*(Pm-r1*Pmak*...
        sin((delta0+(K3*180/pi))*pi/180)))*delta_t;
    fprintf('%7.2f      %9.3f      %10.3f      !\n',...
        t,delta0,omega)
    delta0=delta0+((1/6)*((K1+2*K2+2*K3+K4)*180/pi));
    plot(t,delta0,'m.')
    title('KURVA AYUNAN METODE RUNGE-KUTA ORDE 4')
    xlabel('Waktu, detik')
    ylabel('Delta, derajat')
    hold on
    omega=omega+((1/6)*(L1+2*L2+2*L3+L4));
end
disp('----- waktu pemutus -----')
for t=tp+0.01:0.01:1
    K1=omega*delta_t;
    L1=((pi*fo/H)*(Pm-
r2*Pmak*sin(delta0*pi/180)))*delta_t;

```

```

K2=(omega+0.5*L1)*delta_t;
L2=((pi*fo/H)*(Pm-r2*Pmak*...
    sin((delta0+(0.5*K1*180/pi))*pi/180))*delta_t;
K3=(omega+0.5*L2)*delta_t;
L3=((pi*fo/H)*(Pm-r2*Pmak*...
    sin((delta0+(0.5*K2*pi/180))*pi/180))*delta_t;
K4=(omega+L3)*delta_t;
L4=((pi*fo/H)*(Pm-r2*Pmak*...
    sin((delta0+(K3*180/pi))*pi/180))*delta_t;
fprintf('%7.2f      %9.3f      %10.3f      !\n',...
    t,delta0,omega)
delta0=delta0+((1/6)*((K1+2*K2+2*K3+K4)*180/pi));
plot(t,delta0,'g')
omega=omega+((1/6)*(L1+2*L2+2*L3+L4));
end
disp('-----')
delta0=180/pi*asin(Pm/(Pmak));
omega=0;
for t=0:0.01:tp
    d_delta1=omega;
    d_omega1=((pi*fo/H)*(Pm-r1*Pmak*sin(delta0*pi/180)));
    delta1=(delta0*pi/180+d_delta1*delta_t)*180/pi;
    omega1=omega+d_omega1*delta_t;
    d_delta2=omega1;
    d_omega2=((pi*fo/H)*(Pm-r1*Pmak*sin(delta1*pi/180)));
delta0=delta0+((d_delta1+d_delta2)*180/(2*pi))*delta_t;
omega=omega+((d_omega1+d_omega2)/2)*delta_t;
end
text((tp+0.021),delta0,['Waktu Pemutusan = ',...
    num2str(tp),' Detik'])

```

Jika kode di atas di-Run maka didapatkan hasil sebagai berikut:

```

-----
HASIL PERHITUNGAN SUDUT PEMUTUS KRITIS
DENGAN METODE RUNGE KUTTA ORDE 4
RIMBAWATI, ST.,MT
-----
Arus yang mengalir ke Infinite Bus = 1-0.2i A
Tegangan Internal Transient          = 1.1238 V
Sudut Kerja Awal                    = 17.9319
Sudut Pemutus Kritis                 = 97.7832
Ayunan Sudut Maksimum                 = 149.6813
-----

```

HARGA DELTA DAN OMEGA MELALUI
PENYELESAIAN SECARA NUMERIK
DENGAN METODE Runge-Kutta Orde 4

```

-----
==      WAKTU      !      DELTA      !      OMEGA
==      (Detik)    !      (Derajat)   !      (radian/detik)
-----

```

Waktu Pemutusan (detik) = 1

```

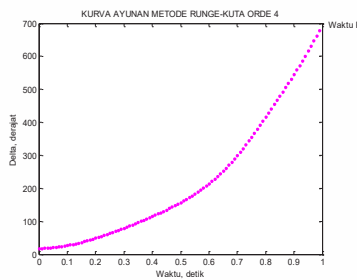
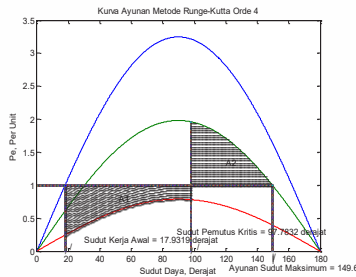
-----
!      0.00      !      17.932     !      0.000      !
!      0.01      !      18.010     !      0.272      !
!      0.02      !      18.243     !      0.543      !
!      0.03      !      18.632     !      0.813      !
!      0.04      !      19.175     !      1.081      !
!      0.05      !      19.870     !      1.345      !
!      0.06      !      20.716     !      1.606      !
!      0.07      !      21.710     !      1.863      !
!      0.08      !      22.850     !      2.115      !
!      0.09      !      24.133     !      2.362      !
!      0.10      !      25.555     !      2.602      !
!      0.11      !      27.113     !      2.836      !
!      0.12      !      28.803     !      3.062      !
!      0.13      !      30.621     !      3.281      !
!      0.14      !      32.562     !      3.492      !
!      0.15      !      34.621     !      3.695      !
!      0.16      !      36.794     !      3.889      !
!      0.17      !      39.075     !      4.074      !
!      0.18      !      41.460     !      4.250      !
!      0.19      !      43.943     !      4.417      !
!      0.20      !      46.520     !      4.575      !
!      0.21      !      49.184     !      4.724      !
!      0.22      !      51.932     !      4.865      !
!      0.23      !      54.757     !      4.997      !
!      0.24      !      57.656     !      5.120      !
!      0.25      !      60.623     !      5.236      !
!      0.26      !      63.654     !      5.345      !
!      0.27      !      66.746     !      5.447      !
!      0.28      !      69.895     !      5.543      !
!      0.29      !      73.097     !      5.633      !
!      0.30      !      76.349     !      5.719      !
!      0.31      !      79.650     !      5.801      !
!      0.32      !      82.997     !      5.880      !
!      0.33      !      86.388     !      5.957      !
!      0.34      !      89.823     !      6.033      !
!      0.35      !      93.301     !      6.109      !
!      0.36      !      96.824     !      6.186      !

```

!	0.37	!	100.391	!	6.265	!
!	0.38	!	104.004	!	6.347	!
!	0.39	!	107.665	!	6.434	!
!	0.40	!	111.377	!	6.526	!
!	0.41	!	115.144	!	6.625	!
!	0.42	!	118.970	!	6.732	!
!	0.43	!	122.860	!	6.848	!
!	0.44	!	126.820	!	6.975	!
!	0.45	!	130.855	!	7.113	!
!	0.46	!	134.973	!	7.265	!
!	0.47	!	139.182	!	7.431	!
!	0.48	!	143.492	!	7.613	!
!	0.49	!	147.910	!	7.813	!
!	0.50	!	152.448	!	8.031	!
!	0.51	!	157.117	!	8.270	!
!	0.52	!	161.929	!	8.530	!
!	0.53	!	166.896	!	8.813	!
!	0.54	!	172.033	!	9.121	!
!	0.55	!	177.353	!	9.454	!
!	0.56	!	182.871	!	9.814	!
!	0.57	!	188.604	!	10.202	!
!	0.58	!	194.567	!	10.618	!
!	0.59	!	200.777	!	11.063	!
!	0.60	!	207.250	!	11.538	!
!	0.61	!	214.004	!	12.042	!
!	0.62	!	221.054	!	12.574	!
!	0.63	!	228.417	!	13.133	!
!	0.64	!	236.108	!	13.716	!
!	0.65	!	244.139	!	14.321	!
!	0.66	!	252.522	!	14.944	!
!	0.67	!	261.266	!	15.580	!
!	0.68	!	270.376	!	16.222	!
!	0.69	!	279.855	!	16.863	!
!	0.70	!	289.699	!	17.497	!
!	0.71	!	299.901	!	18.113	!
!	0.72	!	310.450	!	18.704	!
!	0.73	!	321.328	!	19.261	!
!	0.74	!	332.514	!	19.775	!
!	0.75	!	343.980	!	20.240	!
!	0.76	!	355.696	!	20.649	!
!	0.77	!	367.631	!	21.001	!
!	0.78	!	379.750	!	21.293	!
!	0.79	!	392.020	!	21.529	!
!	0.80	!	404.411	!	21.713	!
!	0.81	!	416.894	!	21.854	!
!	0.82	!	429.447	!	21.961	!

!	0.83	!	442.055	!	22.046	!
!	0.84	!	454.708	!	22.122	!
!	0.85	!	467.406	!	22.204	!
!	0.86	!	480.155	!	22.304	!
!	0.87	!	492.971	!	22.436	!
!	0.88	!	505.874	!	22.612	!
!	0.89	!	518.892	!	22.840	!
!	0.90	!	532.058	!	23.128	!
!	0.91	!	545.407	!	23.481	!
!	0.92	!	558.978	!	23.900	!
!	0.93	!	572.808	!	24.383	!
!	0.94	!	586.931	!	24.924	!
!	0.95	!	601.378	!	25.513	!
!	0.96	!	616.173	!	26.136	!
!	0.97	!	631.331	!	26.776	!
!	0.98	!	646.856	!	27.415	!
!	0.99	!	662.742	!	28.031	!

----- waktu pemutus -----



Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus yang mengalir ke Infinite Bus adalah 1-0.2i A, tegangan internal transien adalah 1.1238 V, sudut kerja awal adalah 17.9319 derajat, sudut pemutus kritis adalah 97.7832 derajat, dan

ayunan sudut maksimum adalah 149.6813 derajat. Simulasi pergerakan sudut delta dan omega selama gangguan dan setelah gangguan menghasilkan grafik ayunan sudut delta terhadap waktu. Berdasarkan input waktu pemutusan (detik) = 1, kita mendapatkan harga delta dan omega melalui penyelesaian secara numerik dengan metode Runge-Kutta orde 4 sebagai berikut: pada waktu 0.00 detik, delta = 17.932 derajat dan omega = 0.000 radian/detik; pada waktu 0.01 detik, delta = 18.010 derajat dan omega = 0.272 radian/detik; dan seterusnya hingga waktu 0.99 detik, delta = 662.742 derajat dan omega = 28.031 radian/detik. Kurva ayunan metode Runge-Kutta orde 4 ditampilkan dalam grafik yang menggambarkan perubahan sudut delta terhadap waktu.

Latihan

1. Hitung arus hubung singkat tiga fasa I_{ff} dalam sebuah sistem yang terdiri dari generator dan motor sinkron, dengan menggunakan reaktansi subtransien dan transien. Sertakan langkah-langkah perhitungannya dan bagaimana hasilnya dibandingkan dengan menggunakan Teorema Thevenin.
2. Tunjukkan bagaimana reaktansi sinkron X_d , transien X_d' , dan subtransien X_d'' mempengaruhi perhitungan tegangan sinkron, transien, dan subtransien. Berikan contoh perhitungan dan diskusikan hasilnya.
3. Sebuah generator sinkron mengalami hubung singkat tiga fasa dengan nilai tegangan sebelum fault V_f dan arus beban I_L . Gunakan persamaan yang diberikan untuk menghitung arus subtransien dari generator dan motor serta tegangan

internal subtransien. Jelaskan bagaimana nilai-nilai ini mempengaruhi sistem secara keseluruhan.

4. Dalam suatu sistem tenaga, diketahui arus fasa dalam koneksi *Wye* adalah $I_a = 44 - j33$, $I_b = -32 + j24$, dan $I_c = -40 + j25$. Hitung arus urutan dalam sistem tersebut dan interpretasikan hasilnya dalam konteks fault yang terjadi.
5. Jelaskan metode numerik yang digunakan untuk menghitung delta dan omega selama dan setelah gangguan pada sistem tenaga listrik. Bandingkan akurasi dan efisiensi metode Runge-Kutta orde 4 dengan metode numerik lainnya.

BAB XVII

IMPEDANSI BUS (Z_{bus})

Pembentukan matriks impedansi Z_{bus} merupakan bagian yang sangat penting dari bab ini, jadi pelajarilah dengan seksama. Matriks Z_{bus} ini dapat diterapkan untuk analisis hubung singkat pada jaringan yang lebih luas. Berikut adalah langkah-langkah pembentukan Z_{bus} :

1. Modifikasi Z_{bus} (#case 1)

Pembentukan referensi node pada bus baru. Representasi matriksnya:

$$V_{n \times 1} = Z_{n \times n} \times j_{n \times 1}$$
$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{n \times n} & 0 \\ 0 & Z_b \end{bmatrix}$$

2. Ekspansi Saluran Transmisi (#case 2)

Ekspansi saluran transmisi dengan $Z_b = j0.25$ pu. Persamaan yang digunakan:

$$V_p = V_k + Z_{kk} I_p + Z_b I_p$$

$$V_n = V_n + Z_{in} I_n$$

$$V_p = V_k + I_p (Z_{kk} + Z_b) = (Z_{k1} I_1 + Z_{k2} I_2 + \dots) + I_p (Z_{kk} + Z_b)$$

Representasi matriks:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & Z_{1k} \\ Z_{org} & n \times n & Z_{2k} \end{bmatrix}$$

3. Penambahan Generator pada Bus Lama dengan Z_b (#case 3)

$$Z_{ii}^{baru} = Z_{ii}^{lama} - \frac{Z_{ki}Z_{ik}}{Z_{kk}}$$

$$Z_{ij}^{baru} = Z_{ij}^{lama} - \frac{Z_{ki}Z_{ik}}{Z_{kk}}$$

4. Saluran Baru antara Dua Bus yang Sudah Ada (#case 4)

Bentuk representasi matriks:

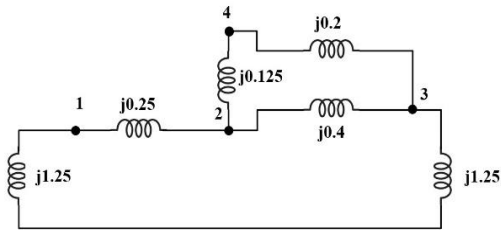
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & col_k - col_j \\ & Z_{org} & & \\ (row_k - row_j) & & & \\ & & Z_S & \end{bmatrix}$$

Dimana $Z_S = Z_{kk} + Z_{jj} + Z_b - 2Z_{kj}$

Rumus reduksi matriks:

$$Z_{ii}^{baru} = Z_{ii}^{lama} - \frac{Z_{ki}Z_{ik}}{Z_{kk}}$$

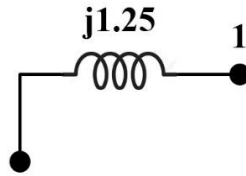
#Ilustrasi Pembentukan Zbus



Gambar 17.1 Diagram Impedansi Bus

Misalnya, diketahui sebuah jaringan seperti gambar 17.1 di atas, maka langkah-langkah pembentukan Zbus-nya adalah:

1. Case 1 (Modifikasi Zbus)



Gambar 17.2 Step 1

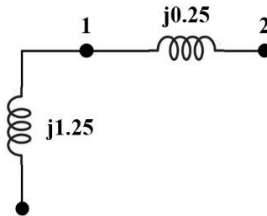
Bentuk matriks Z_{bus} :

$$Z_{1 \times 1} = [j1.25]$$

Catatan: Semua nilai impedansi dalam matriks Z_{bus} menggunakan satuan pu (per unit).*

2. Case 2 (Ekspansi Saluran Transmisi)

Bentuk matriks Z_{bus} :



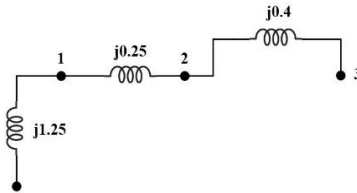
Gambar 17.3 Step 2

Bentuk matriks Z_{bus} :

$$Z_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} j1.25 & j1.25 \\ j1.25 & j1.25 \end{bmatrix}$$

Dalam hal ini, $j1.50 = Z_{kk} + Z_{br}$, dimana $Z_{kk} = Z_{11} = j1.25$ dan $Z_b = j0.25$ karena kita telah melakukan ekspansi saluran transmisi dengan impedansi di $j0.25$.

3. Case 3 (Penambahan Generator pada Bus Baru)
Matriks Z_{bus} yang baru:



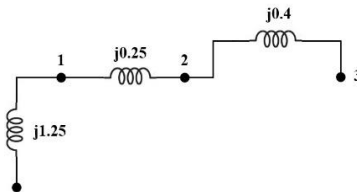
Gambar 17.4 Step 3

Matriks Z_{bus} yang baru = $Z_{3 \times 3}$

$$Z_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} j1.25 & j1.25 & j1.25 \\ j1.25 & j1.50 & j1.50 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 \end{bmatrix}$$

Penjelasan: Komponen Z_{11} , Z_{12} , Z_{13} , dan Z_{14} merupakan matriks Z_{bus} asli dari langkah ke-2, sedangkan $Z_{kk} = Z_{33} = Z_{22} + Z_b$.

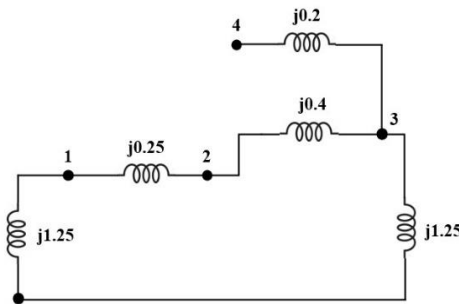
4. Case 2 (ekspansi saluran transmisi)



Gambar 17.5 Step 4

$$Z_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} j1.25 & j1.25 & j1.25 & j1.25 \\ j1.25 & j1.50 & j1.50 & j1.50 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 & j1.90 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 & j2.10 \end{bmatrix}$$

5. Case 3 (penambahan generator pada bus baru)



Gambar 17.6 Step 5

Pertama kita gunakan langkah-langkah pada case 2 sehingga diperoleh $Z_{5 \times 5}$

$$\begin{bmatrix} j1.25 & j1.25 & j1.25 & j1.25 & j1.25 \\ j1.25 & j1.50 & j1.50 & j1.50 & j1.50 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 & j1.50 & j1.90 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 & j2.10 & j1.90 \\ j1.25 & j1.50 & j1.90 & j1.90 & j3.15 \end{bmatrix}$$

Kedua kita harus mereduksi matriks $Z_{5 \times 5}$ menjadi $Z_{4 \times 4}$ dengan cara mengeliminasi baris 5 dan kolom 5, sehingga

komponen-komponen matriks yang baru diperoleh dengan rumus mereduksi matriks.

$$\begin{aligned}
 Z_{11}^{baru} &= Z_{11}^{lama} - \frac{Z_{15}Z_{51}}{Z_{55}} \\
 &= j1.25 - j1.25 \times j1.25 / j3.15 \\
 &= j0.754 \\
 Z_{12}^{baru} &= j1.25 - j1.25 \times j1.50 / j3.15 \\
 &= j0.650 \\
 Z_{13}^{baru} &= j1.25 - j1.25 \times j1.90 / j3.15 \\
 &= j0.496 \\
 Z_{14}^{baru} &= j1.25 - j1.25 \times j1.90 / j3.15 \\
 &= j0.496
 \end{aligned}$$

Dan seterusnya sehingga diperoleh $Z_{4 \times 4}$

$$\begin{bmatrix}
 j0.754 & j0.650 & j0.596 & j0.496 \\
 j0.650 & j0.786 & j0.595 & j0.595 \\
 j0.496 & j0.595 & j0.754 & j0.754 \\
 j0.496 & j0.595 & j0.754 & j0.954
 \end{bmatrix}$$

Jika kita lihat lebih teliti, matriks di atas memiliki pola tertentu sehingga tidak perlu dihitung untuk mencari setiap komponennya.

6. Case 4 (penambahan saluran baru antara dua bus lama)
 # Pertama kita bentuk matriks 5×5 dengan mengambil matriks 4×4 yang didapat dari step 5 dengan menambah kolom 5 dan baris 5, di mana:

$$\text{kolom } 5 = \text{kolom } k - \text{kolom } j$$

$$\text{baris } 5 = \text{baris } k - \text{baris } j$$

k, j adalah dua bus lama pada ujung-ujung saluran baru yang ditambahkan, dalam hal ini $k = 2$ dan $j = 4$, Jadi:

$$Z_{15} = Z_{12} - Z_{14} = j0.650 - j0.496 = j0.154$$

$$Z_{25} = Z_{22} - Z_{24} = j0.786 - j0.595 = j0.191$$

$$Z_{51} = Z_{21} - Z_{41} = j0.650 - j0.496 = j0.154$$

$$Z_{52} = Z_{22} - Z_{42} = j0.786 - j0.595 = j0.191$$

$$Z_{55} = Z_{kk} + Z_{jj} + Z_{bb} - 2Z_{kj} = j0.786 + j0.954 + j0.125 - 2 \times j0.595 = j0.675$$

Sehingga kita dapatkan matriks 5×5 :

$$\begin{bmatrix} j0.754 & j0.650 & j0.596 & j0.496 & j0.154 \\ j0.650 & j0.786 & j0.595 & j0.595 & j0.191 \\ j0.496 & j0.595 & j0.754 & j0.754 & -j0.159 \\ j0.496 & j0.595 & j0.754 & j0.954 & -j0.359 \\ j0.154 & j0.191 & j0.159 & -j0.359 & j0.675 \end{bmatrix}$$

Kedua, reduksi matriks 5×5 menjadi 4×4 dengan cara yang sama seperti step 5 (dengan rumus reduksi matriks), sehingga kita peroleh matriks 4×4 :

$$\begin{bmatrix} j0.75 & j0.61 & j0.53 & j0.58 \\ j0.61 & j0.73 & j0.63 & j0.69 \\ j0.53 & j0.64 & j0.75 & j0.67 \\ j0.58 & j0.69 & j0.67 & j0.76 \end{bmatrix}$$

Inilah representasi matriks Z_{bus} dari jaringan sampel di atas. Perlu diketahui bahwa matriks Z_{bus} yang didapat berukuran 4×4 karena jaringan memiliki 4 buah bus. Selanjutnya, jika kita ingin menentukan besar arus hubung singkat tiga fasa di masing-masing bus, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

$$I_{hs}^{(1)} = \frac{1}{Z_{11}} = \frac{1}{0.72} pu$$

$$I_{hs}^{(2)} = \frac{1}{Z_{22}} = \frac{1}{0.73} pu$$

$$I_{hs}^{(3)} = \frac{1}{Z_{33}} = \frac{1}{0.72} pu$$

$$I_{hs}^{(4)} = \frac{1}{Z_{44}} = \frac{1}{0.76} pu$$

Sementara itu, tegangan masing-masing bus setelah gangguan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{baru} = V_{lama} + Z_{bus} \cdot I$$

Dengan demikian, melalui matriks Z_{bus} , kita dapat menghitung besar arus hubung singkat tiga fasa dan tegangan setiap bus setelah terjadinya hubung singkat tiga fasa.

Latihan

1. Sebuah jaringan listrik memiliki matriks Z_{bus} sebagai berikut:

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.3 & j0.1 & j0.05 \\ j0.1 & j0.25 & j0.15 \\ j0.05 & j0.15 & j0.4 \end{bmatrix}$$

Hitung arus hubung singkat tiga fasa pada bus ke-3.

2. Diberikan sebuah jaringan dengan matriks Z_{bus} :

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.4 & j0.2 & j0.1 \\ j0.2 & j0.3 & j0.15 \\ j0.1 & j0.15 & j0.35 \end{bmatrix}$$

Jika terjadi gangguan dengan arus $I = j3.0$ pu, hitung tegangan pada masing-masing bus setelah gangguan.

3. Diberikan matriks Z_{bus} :

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.25 & j0.1 & j0.05 & j0.02 \\ j0.1 & j0.2 & j0.08 & j0.03 \\ j0.05 & j0.08 & j0.3 & j0.1 \\ j0.02 & j0.03 & j0.1 & j0.4 \end{bmatrix}$$

Hitung arus hubung singkat tiga fasa pada bus ke-4.

4. Untuk jaringan dengan matriks Z_{bus} :

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.35 & j0.25 & j0.07 \\ j0.15 & j0.3 & j0.1 \\ j0.07 & j0.1 & j0.25 \end{bmatrix}$$

Jika terjadi penambahan saluran baru antara bus ke-1 dan bus ke-3 dengan impedansi $Z_b = j0.2$ pu, hitung matriks Z_{bus} yang baru.

5. Diberikan jaringan dengan matriks Z_{bus} :

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.2 & j0.1 & j0.05 & j0.02 \\ j0.1 & j0.25 & j0.08 & j0.03 \\ j0.05 & j0.08 & j0.3 & j0.1 \\ j0.02 & j0.03 & j0.1 & j0.4 \end{bmatrix}$$

Jika terjadi penambahan generator pada bus ke-2 dengan impedansi $Z_b = j0.15$ pu, hitung matriks Z_{bus} yang baru setelah penambahan generator.

BAB XVIII

GANGGUAN EKSTERNAL DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

Tenaga listrik disalurkan ke masyarakat melalui jaringan distribusi. Oleh sebab itu, jaringan distribusi merupakan bagian jaringan listrik yang paling dekat dengan masyarakat. Jaringan distribusi dikelompokkan menjadi dua, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 kV, 12 kV, dan 6 kV. Saat ini, tegangan distribusi primer yang cenderung dikembangkan oleh PLN adalah 20 kV. Tegangan pada jaringan distribusi primer diturunkan oleh gardu distribusi menjadi tegangan rendah sebesar 380/220 V, dan disalurkan kembali melalui jaringan tegangan rendah kepada konsumen.

Dalam operasi sistem tenaga listrik sering terjadi gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah penghalang dari suatu sistem yang sedang beroperasi atau suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Suatu gangguan di dalam peralatan listrik didefinisikan sebagai terjadinya kerusakan di dalam jaringan listrik yang menyebabkan aliran arus listrik keluar dari saluran yang seharusnya. Berdasarkan ANSI/IEEE Std. 100-1992, gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisik yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen, atau elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fase atau hubung singkat

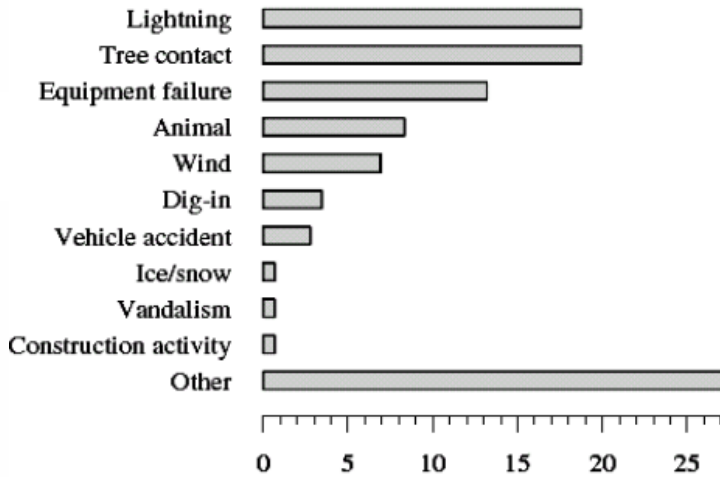
fase ke tanah. Suatu gangguan hampir selalu berupa hubung langsung atau melalui impedansi. Istilah gangguan identik dengan hubung singkat, sesuai standar ANSI/IEEE Std. 100-1992.

Hubung singkat merupakan suatu hubungan abnormal (termasuk busur api) pada impedansi yang relatif rendah yang terjadi secara kebetulan atau disengaja antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda. Istilah gangguan atau gangguan hubung singkat digunakan untuk menjelaskan suatu hubungan singkat.

Tujuan menganalisis gangguan pada jaringan distribusi adalah:

1. Untuk menentukan arus maksimum dan minimum hubung singkat tiga fasa.
2. Untuk menentukan arus gangguan tak simetris bagi gangguan satu dan dua line ke tanah, gangguan line ke line, dan rangkaian terbuka.
3. Penyelidikan operasi rele-rele proteksi.
4. Untuk menentukan kapasitas pemutus dari circuit breaker.
5. Untuk menentukan distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan busbar selama gangguan (Weedy, 1988: 299).

Berdasarkan studi yang telah dilakukan EPRI (Burke and Lawrence, 1984; EPRI 1209-1, 1983), penyebab terjadinya gangguan permanen pada jaringan distribusi seperti gambar 167 berikut:



Gambar 18.1 Persentase Gangguan

Hampir 40% dari gangguan yang diteliti terjadi pada periode cuaca yang tidak menguntungkan seperti cuaca hujan, dingin, dan salju. Gangguan distribusi terjadi pada satu fase, dua fase, atau ketiga fasenya. Hal ini disebabkan oleh hampir sebagian besar panjang saluran distribusi yang merupakan saluran satu fase; setiap gangguan satu fasa hanya mencakup bagian satu fase. Begitu juga bagian tiga fase, beberapa jenis gangguan cenderung terjadi dari fase ke tanah. Gangguan yang disebabkan oleh peralatan dan hewan cenderung terjadi dari fase ke tanah. Pohon juga dapat menyebabkan gangguan satu fase ke tanah pada sistem tiga fase, tetapi gangguan fase-fase lebih sering terjadi. Gangguan petir cenderung menyebabkan gangguan dua atau tiga fase ke tanah pada sistem tiga fase.

Gangguan-gangguan tersebut menyebabkan:

1. Menginterupsi kontinuitas pelayanan daya kepada para konsumen apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian atau menyebabkan keluarnya satu unit pembangkit.
2. Penurunan tegangan yang cukup besar yang menyebabkan rendahnya kualitas tenaga listrik dan merintanginya kerja normal pada peralatan konsumen.
3. Pengurangan stabilitas sistem dan menyebabkan jatuhnya generator.
4. Merusak peralatan pada daerah terjadinya gangguan itu.

A. Jenis Gangguan

Pada dasarnya, gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi saluran 20 kV dapat digolongkan menjadi dua macam, yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem. Gangguan yang berasal dari luar sistem disebabkan oleh sentuhan daun/pohon pada penghantar, sambaran petir, manusia, binatang, cuaca, dan lain-lain. Sedangkan gangguan yang datang dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dari fungsi peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan pemutus beban, dan kesalahan pada alat pendeteksi. Klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi (Hutauruk, 1987: 4) adalah:

Dari jenis gangguannya:

- Gangguan dua fasa atau tiga fasa melalui hubungan tanah
- Gangguan fasa ke fasa
- Gangguan dua fasa ke tanah
- Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah

Dari lamanya gangguan:

- Gangguan permanen
- Gangguan temporer

1. Gangguan yang bersifat temporer

Gangguan yang bersifat temporer ini apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal kembali. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya, kemudian disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi, dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen. Salah satu contoh gangguan yang bersifat temporer adalah gangguan akibat sentuhan pohon yang tumbuh di sekitar jaringan, akibat binatang seperti burung, kelelawar, ular, dan layangan. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi, maka hal tersebut akan menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

2. Gangguan yang bersifat permanen

Gangguan permanen tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen. Untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau

menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Terjadinya gangguan ditandai dengan jatuhnya pemutus tenaga; untuk mengatasinya operator memasukkan tenaga secara manual. Contoh gangguan ini yaitu adanya kawat yang putus, terjadinya gangguan hubung singkat, dahan yang menimpa kawat fasa dari saluran udara, dan terjadinya gangguan hubung singkat.

B. Penyebab Gangguan

Gangguan biasanya diakibatkan oleh kegagalan isolasi di antara penghantar fasa atau antara penghantar fasa dengan tanah. Secara nyata, kegagalan isolasi dapat menghasilkan beberapa efek pada sistem, yaitu menghasilkan arus yang cukup besar atau mengakibatkan adanya impedansi di antara konduktor fasa atau antara penghantar fasa dan tanah. Penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi disebabkan karena (Hutauruk, 1987: 3):

- Kesalahan mekanis
- Kesalahan termis
- Karena tegangan lebih
- Karena material yang cacat atau rusak
- Gangguan hubung singkat
- Konduktor putus

Faktor-faktor penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi adalah karena (Hutauruk, 1987: 4):

- Surja petir atau surja hubung
- Burung atau daun-daun
- Polusi debu
- Pohon-pohon yang tumbuh di dekat jaringan
- Keretakan pada isolator
- Andongan yang terlalu kendor

Secara umum, gangguan dibedakan pada dua kondisi tegangan saat terjadinya gangguan, yaitu gangguan terjadi pada tegangan normal dan gangguan terjadi pada tegangan lebih.

Latihan

1. Analisis dampak gangguan hubung singkat pada stabilitas sistem tenaga listrik. Jelaskan mekanisme gangguan ini dan bagaimana hal tersebut dapat mempengaruhi operasi generator.
2. Diskusikan peran dan fungsi rele proteksi dalam mengatasi gangguan pada jaringan distribusi listrik. Bagaimana rele proteksi dapat mendeteksi dan mengisolasi gangguan?
3. Gangguan permanen pada jaringan distribusi dapat disebabkan oleh berbagai faktor. Jelaskan analisis teknis yang harus dilakukan untuk mengidentifikasi dan memperbaiki gangguan permanen pada sistem distribusi listrik.
4. Jelaskan konsep arus hubung singkat tiga fasa dan bagaimana perhitungan arus maksimum dan minimum hubung singkat dilakukan. Apa implikasi dari hasil perhitungan ini terhadap desain dan operasional sistem tenaga listrik?
5. Evaluasi faktor-faktor yang menyebabkan gangguan hubung singkat dalam sistem distribusi listrik. Jelaskan bagaimana analisis gangguan ini dapat membantu dalam perencanaan dan peningkatan keandalan sistem distribusi.

Glosarium

Asimtot	Garis yang mendekati kurva tetapi tidak pernah benar-benar menyentuhnya pada grafik fungsi matematika, terutama saat kurva bergerak menuju tak terhingga.
Daya	Ukuran laju energi yang dikonsumsi atau dipindahkan dalam suatu sistem dalam periode waktu tertentu.
Diagram	Representasi grafis dari data, konsep, atau sistem yang dirancang untuk memudahkan pemahaman dan analisis. Diagram sering digunakan untuk menggambarkan hubungan antara berbagai elemen, alur proses, atau struktur dari suatu sistem dengan cara yang visual dan mudah diinterpretasikan.
Kapasitor	Komponen elektronik yang digunakan untuk menyimpan dan melepaskan energi dalam bentuk muatan listrik.
Kurva	Sebuah garis yang tidak lurus pada bidang atau ruang yang terbentuk dari kumpulan titik-titik yang mengikuti suatu aturan atau persamaan tertentu.
MATLAB	Sebuah perangkat lunak dan bahasa pemrograman yang dikembangkan

	<p>untuk komputasi numerik, pemrograman, dan visualisasi data. MATLAB memiliki berbagai kegunaan, termasuk analisis data, pengembangan algoritma, pemrosesan sinyal dan citra, pemodelan sistem, simulasi, dan kontrol sistem.</p>
Newton	<p>Satuan gaya dalam Sistem Internasional (SI). Satu Newton didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk mempercepat objek dengan massa satu kilogram pada percepatan satu meter per detik kuadrat.</p>
Reaktor	<p>Kadang-kadang digunakan untuk merujuk pada komponen yang menginduksi atau mengatur reaksi dalam rangkaian elektronik, meskipun istilah ini lebih jarang digunakan dalam konteks ini.</p>
Transformator	<p>Perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah tingkat tegangan dalam suatu sistem listrik. Fungsi utama dari transformator adalah untuk meningkatkan (step-up) atau menurunkan (step-down) tegangan listrik sesuai kebutuhan, sambil mempertahankan frekuensi yang sama.</p>

Daftar Pustaka

- Cekdin Cekmas (2007) "Sistem Tenaga Listrik", Andi Yogyakarta
- Saadat, H. (1999) *Power System Analysis*. Milwaukee School of Engineering, McGraw-Hill, New Delhi.
- Nasar, S. A. (1990) *Theory and Problems of Electric Power System*. Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Publishing Company, New York.
- Hutauruk, T. S. (1984) *Transmisi Sistem Tenaga Listrik*. Andi, Yogyakarta.

Tentang Penulis



Rimbawati, ST., MT lahir di Rantau Prapat pada tanggal 13 April 1975, menyelesaikan pendidikan strata 1 di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara tahun 1998, kemudian menyelesaikan studi magister teknik pada tahun 2007. Saat ini menjadi staf pengajar di Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dengan mengampu Matakuliah Analisa Sistem Tenaga serta Energi Baru dan Terbarukan.

Muhammad Zayadi, S.Pd lahir pada 1 Juli 1991 di Desa Mamben Daya, Kecamatan Wanasaba, Kabupaten Lombok Timur. Ia merupakan lulusan program Tadris Matematika dari IAIN Mataram (sekarang UIN Mataram). Kemampuan yang dimiliki adalah mengembangkan aplikasi matematika dan mengolah data statistik menggunakan berbagai perangkat lunak seperti MATLAB, SPSS dan lain-lain. Beliau berkomitmen untuk terus melakukan kajian terhadap sistem tenaga listrik melalui pendekatan pemrograman yang inovatif, kreatif, sistematis dan mudah di pahami dengan menerapkan teknik komputasi dalam pemrograman berbantu MATLAB.





Partaonan Harahap, ST.,MT lahir di Medan tanggal 11 Juli 1982, Saya menyelesaikan pendidikan sarjana S1 di Fakultas Teknik Universtas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) Program Studi Teknik Elektro pada Tahun 2005, kemudian melanjutkan pendidikan S2 Departemen Fakultas Teknik Universtas Sumatera Utara Program Studi Magister Teknik Elektro. Saat kuliah, Selama menyelesaikan pendidikan S2, saya juga aktif sebagai dosen dan menulis beberapa artikel di jurnal terkemuka di bidang Teknik Elektro. Saya juga terlibat dalam berbagai kegiatan sosial dan kemanusiaan di universitas dan masyarakat sekitar dan anggota profesi di ForteI, FKD Sumatera Utara dan PII.



Noorly Evalina, ST, MT lahir di Rantau Prapat tanggal 9 Juli 1969. Saya menyelesaikan Sarjana Teknik Elektro pada tahun 1993 di Universitas Al-Azhar Medan, serta meraih gelar Magister Teknik Elektro dari Institut Sains dan Teknologi Jakarta pada tahun 2012, karir berawal dari mengajar di STM Prayatna Medan tahun 1992, dan sejak 1994 mengabdikan diri di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, juga pernah mengajar di Universitas AL-Azhar dan Universitas Islam Sumatera Utara, saya juga aktif sebagai dosen dan menulis beberapa artikel di jurnal terkemuka di bidang Teknik Elektro. Saya juga terlibat dalam Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat di bidang Sistem Kontrol dan Instrumentasi. Saya juga terlibat dalam berbagai kegiatan sosial dan kemanusiaan di universitas dan masyarakat sekitar dan aktif dalam organisasi Masvarakat Kelistrikan Indonesia (MKI).

Tentang Editor



Ir. Dultudes Mangopo, S.T., M.T. Lahir di Kapolang Toraja Utara pada tanggal 27 Desember 1971. Menyelesaikan pendidikan Strata 1 di UKIP Makassar tahun 1997, kemudian menyelesaikan pendidikan studi Magister Teknik pada tahun 2007 di UGM Yogyakarta dan menyelesaikan Profesi Insinyur pada tahun 2023 di Institut Teknologi Indonesia Jakarta. Saat ini menjadi Staf pengajar di Program Studi Teknik Elektro Universitas Cenderawasih dengan mengampuh mata kuliah Analisa Sistem Tenaga Listrik, Sistem Distribusi Tenaga Listrik dan Operasi Sistem Tenaga Listrik.

Indeks

A

Algoritma, 1, 3, 64, 66, 71,
72, 74, 80, 83, 88, 90, 242,
318
Aliran, ix, 94, 97, 98, 99, 104,
105, 109, 110, 113, 145, 151,
181, 182, 183, 184, 185, 186,
187, 188, 190, 205, 206, 209,
210, 239, 242, 243, 272, 275,
276, 277, 279, 280, 294, 309
Analisis, ix, 1, 95, 97, 98, 99,
100, 126, 142, 143, 144, 145,
158, 159, 162, 163, 165, 181,
182, 185, 186, 275, 276, 278,
282, 296, 297, 315, 316, 317,
318
Asimtot, 29, 30, 41

B

Beban, 93, 94, 97, 99, 101,
105, 106, 107, 108, 109, 114,
120, 123, 124, 125, 126, 127,
136, 137, 138, 139, 140, 142,
144, 151, 152, 159, 160, 161,
162, 163, 165, 181, 182, 183,
184, 185, 186, 187, 189, 209,

242, 272, 273, 274, 275, 277,
278, 279, 280, 295, 312

D

Data, 1, 2, 3, 14, 43, 66, 189,
209, 242, 272, 282, 306, 317,
318, 321
Daya, ix, 94, 95, 96, 97, 98,
99, 101, 103, 104, 105, 106,
107, 108, 110, 111, 112, 113,
114, 115, 116, 118, 119, 120,
123, 124, 125, 126, 127, 129,
131, 132, 142, 143, 144, 145,
151, 161, 181, 182, 183, 184,
185, 186, 187, 188, 189, 190,
193, 195, 198, 199, 201, 205,
206, 207, 208, 209, 210, 214,
215, 216, 217, 220, 222, 223,
227, 228, 229, 230, 233, 235,
236, 239, 242, 243, 247, 248,
249, 253, 255, 259, 260, 265,
266, 272, 275, 276, 277, 279,
282, 294, 311
Diagram, 93, 109, 110, 141,
142, 150, 152, 165, 166, 169,
317

Distribusi, vii, ix, 93, 94, 101,
105, 106, 309, 310, 311, 312,
314, 315, 316

E

Ekspansi, 297, 299
Energi, 93, 94, 99, 101, 317

K

Komputer, 4, 5, 6, 63, 65, 71,
74, 84, 97, 159, 162, 165,
182
Kurva, 29, 34, 38, 39, 41, 80,
317

L

Limit, 25, 77, 78, 80
Listrik, vii, 93, 94, 95, 98, 99,
100, 101, 102, 103, 104, 105,
106, 107, 108, 109, 110, 111,
113, 119, 120, 124, 125, 126,
129, 142, 143, 144, 145, 150,
163, 181, 182, 184, 185, 186,
187, 189, 205, 209, 242, 272,
275, 282, 294, 295, 296, 304,
305, 309, 312, 314, 315, 316,
317, 318, 321

M

Matematika, 5, 23, 43, 321
MATLAB, 1, 2, 3, 4, 5, 22, 41,

115, 118, 134, 135, 139, 149,
150, 170, 172, 190, 210, 243,
282, 317, 321

Matriks, 22, 43, 51, 96, 168,
207, 245, 251, 257, 263, 297,
300

Model, 150

N

Netral, 109, 110, 119, 121,
122, 125, 126, 127, 130, 132,
150, 151, 152, 166, 169, 181,
187

P

Pemrograman, 1, 3, 6, 25, 43,
63, 71, 317, 321

R

Reaktansi, 103, 104, 148, 149,
150, 152, 153, 155, 156, 157,
158, 165, 278, 279, 280, 281,
282, 294, 295, 296

S

Sistem, ii, vii, ix, 3, 13, 43, 93,
94, 95, 96, 97, 98, 99, 100,
101, 102, 103, 104, 105, 106,
107, 108, 109, 110, 113, 119,
120, 121, 123, 124, 125, 126,
127, 129, 130, 133, 135, 142,

152, 153, 154, 156, 157, 158,
159, 165, 181, 184, 185, 186,
187, 189, 190, 205, 206, 207,
209, 210, 239, 240, 242, 243,
272, 273, 274, 275, 276, 277,
280, 282, 294, 295, 296, 309,
311, 312, 314, 315, 316, 317,
318, 321

T

Transmisi, vii, ix, 93, 101,
103, 104, 107, 108, 110, 129,
143, 144, 150, 151, 153, 154,
155, 156, 157, 158, 184, 187,
277, 294, 295, 297, 299, 300,
304, 306

W

Window, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 25,
41, 43, 72, 73



Analisa SISTEM TENAGA

Buku ini berisi dasar-dasar program MATLAB berupa pemrograman kalkulus dasar, matriks, struktur if-elseif-else-end, for-end dan while end yang di implementasikan dalam analisis sistem tenaga listrik. Selanjutnya hal yang mendasar dalam buku ini adalah pembahasan terkait sistem tenaga listrik secara umum dari sistem pembangkitan, transmisi dan beban. Beberapa analisis seperti analisis sistem per-unit, matriks impedansi, analisis aliran daya, analisis gangguan, dan analisis Impedansi bus berbantu program MATLAB juga disajikan dalam buku ajar ini. Sebagai bahan pembelajaran juga di sajikan soal latihan dan tugas-tugas yang dapat meningkatkan daya kreativitas mahasiswa. Semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca.



Jl. Kapten Mukhtar Basri No. 3
Medan, Sumatera Utara
Website: <http://umsupress.umsu.ac.id/>
Email: umsupress@umsu.ac.id

REFERENSI

ISBN 978-623-408-804-5



ISBN 978-623-408-805-2 (PDF)



Harga P. Jawa Rp. 92 000,00