

Fenomena *Steady State Stability* Disimulasikan dengan Aplikasi Berbasis *MATLAB* melalui Perubahan Daya pada Beban Terpasang di Setiap *Bus*

Arief Goeritno¹⁾, Tapip Hendrawan²⁾

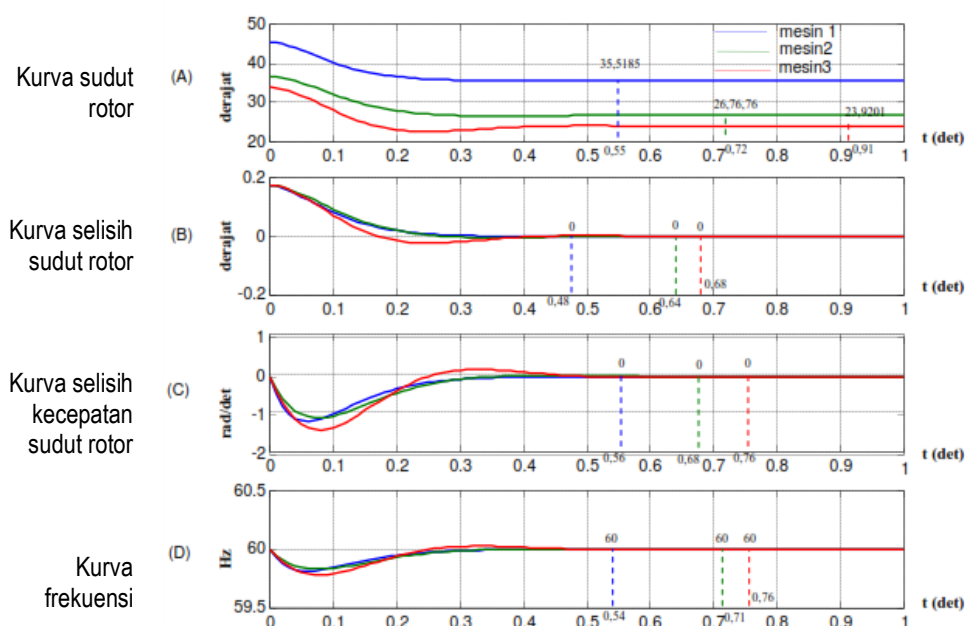
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. K.H. Sholeh Iskandar km.2 Kedung Badak, Tanah Sareal, Kota Bogor 16164
PT (Persero) Telekomunikasi Indonesia (Telkom), Tbk.
Jl. Jenderal Gatot Subroto Kav.52, Jakarta Selatan 12710
Email: arief.goeritno@uika-bogor.ac.id

Abstrak. Telah dilakukan simulasi lanjutan terhadap fenomena *steady state stability* untuk perolehan sejumlah parameter melalui penetapan data asumsi untuk perubahan beban di setiap bus. Daya aktif di luar bus ayun selalu tetap, tetapi daya reaktif berubah untuk pengaturan tegangan sistem. Nilai sudut rotor berbanding lurus dengan perubahan daya beban, sehingga saat keadaan stabil daya mekanis sesuai kondisi daya beban, dengan daya mekanis berpengaruh terhadap nilai sudut rotor. Pencapaian waktu stabil selisih sudut rotor tidak dipengaruhi oleh perubahan daya beban, tetapi perubahan daya beban berakibat pencapaian waktu stabil selisih kecepatan sudut rotor relatif lebih lambat. Generator dengan kapasitas besar perlu waktu pencapaian stabil lebih lambat. Sistem kembali stabil pada saat mesin terakhir capai waktu stabil dalam hal kesamaan frekuensi, urutan fase, dan sudut fase.

Kata kunci: fenomena *steady state stability*, sistem daya listrik, simulasi, aplikasi berbasis *MATLAB*, perubahan daya pada beban terpasang.

1. Pendahuluan

Hasil penelitian berkenaan dengan aplikasi berbasis *MATLAB* untuk simulasi fenomena *steady state stability* [1], telah diperoleh tiga macam struktur sintaks program berbasis *MATLAB* [2-4] untuk pelaksanaan simulasi fenomena *steady state stability* [1] terhadap struktur analogi sistem daya listrik dengan empat bus dan tiga unit pembangkit [1,5] yang meliputi (a) program untuk peng-input-an data nilai-nilai asumsi, (b) program untuk fenomena aliran daya, dan (c) program untuk fenomena *steady state stability*. Hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal [1], seperti ditunjukkan Gambar 1.



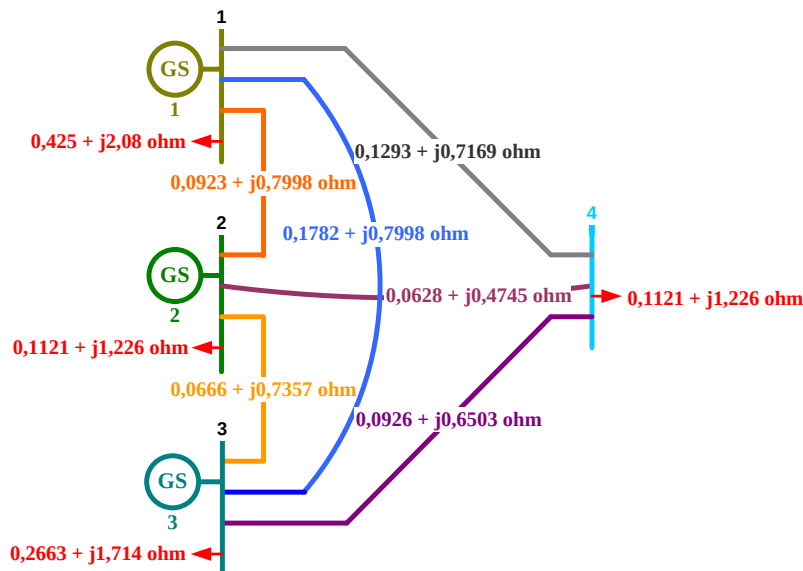
Gambar 1. Hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal

Berdasarkan Gambar 1 dapat dijelaskan, bahwa terdapat penunjukan nilai sejumlah parameter pada mesin-1, mesin-2, dan mesin-3, yaitu (a) perubahan nilai sudut rotor saat pencapaian keadaan stabil, (b) pencapaian waktu saat delta rotor tercapai pada 0 derajat (stabil), (c) pencapaian waktu saat nilai delta omega tercapai 0 rad/det (stabil), dan (d) pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil). Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban [1].

Keberadaan sifat gangguan yang berakibat kepada masalah stabilitas di sistem daya listrik, maka stabilitas dibedakan atas (i) stabilitas kondisi tetap (*steady state stability*), (ii) stabilitas peralihan (*transient stability*), dan stabilitas subperalihan/dinamis (*subtransient/dynamic stability*) [6,7]. *Steady state stability* merupakan fenomena kemampuan sistem untuk bertahan dalam kondisi sinkronisasi antar mesin dalam sistem setelah terjadi gangguan kecil berupa fluktuasi atau perubahan beban yang dapat berupa penambahan atau pengurangan terhadap sejumlah daya pada sisi beban [8,9,6]. Stabilitas peralihan merupakan fenomena kemampuan sistem untuk bertahan dalam kondisi setelah terjadi gangguan besar yang bersifat dadakan dalam kisaran satu ayunan (*swing*) pertama [5] dengan asumsi, bahwa pengontrol tegangan otomatis belum beroperasi [8,9]. Stabilitas subperalihan atau dinamis merupakan fenomena kemampuan untuk bertahan setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*), sehingga sistem tetap mampu bertahan dalam kondisi sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru atau dikatakan sistem dalam stabilitas *transient*, apabila *automatic voltage regulator* (AVR) dan governor beroperasi cepat dan diperhitungkan dalam analisis [8,9,6].

Berdasarkan hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal [1], maka dilakukan pembuatan kondisi untuk fenomena *steady state stability* melalui perubahan daya pada beban di setiap bus. Pembuatan kondisi lebih lanjut terhadap setiap perubahan beban di setiap bus, maka ditetapkan sejumlah tujuan penelitian. Tujuan penelitian ini memperoleh sejumlah fenomena *steady state stability* melalui data nilai-nilai asumsi untuk perubahan beban di setiap bus dengan kondisi saat terdapat (a) pengurangan daya pada bus-1, (b) penambahan daya pada bus-2, (c) penambahan daya pada bus-3, dan (d) pengurangan daya pada bus-4.

Struktur analogi sistem daya listrik untuk simulasi dengan empat bus dan tiga unit pembangkit [5,1], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur analogi sistem daya listrik untuk simulasi dengan empat bus dan tiga unit pembangkit

Berdasarkan Gambar 2 ditunjukkan, bahwa telah dihasilkan parameter-parameter dalam permodelan matematis melalui pemberian nilai-nilai asumsi dengan nilai saluran transmisi dengan basis pada 100 MVA, sehingga diperoleh satuan *per unit* [1]. Nilai komponen saluran transmisi penghubung [1], seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai komponen saluran transmisi penghubung

Dari bus	Ke bus	R (p.u.)	X (p.u.)
1	2	9,23	79,98
1	3	12,93	71,69
1	4	17,82	79,98
2	3	6,28	47,45
2	4	6,66	73,57
3	4	9,26	65,03

Nilai daya beban (*demand*) di setiap bus [1], seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai daya beban (*demand*) di setiap bus

Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	$V_{maks.}$ (p.u.)	$V_{min.}$ (p.u.)
1	42,50	203,8	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai keadaan awal masing-masing generator sistem pembangkitan sebelum proses perhitungan aliran daya [1], seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai keadaan awal masing-masing generator sistem pembangkitan sebelum proses perhitungan aliran daya

Bus	P_m (MW)	Q_m (MVar)	V (p.u.)	δ (der. list.)	H (MJA/MVA)	f_0 (Hz.)
1	0	0	1,03	0	2,32	60
2	45	0	1,025	0	3,4	60
3	50	0	1,03	0	4,63	60

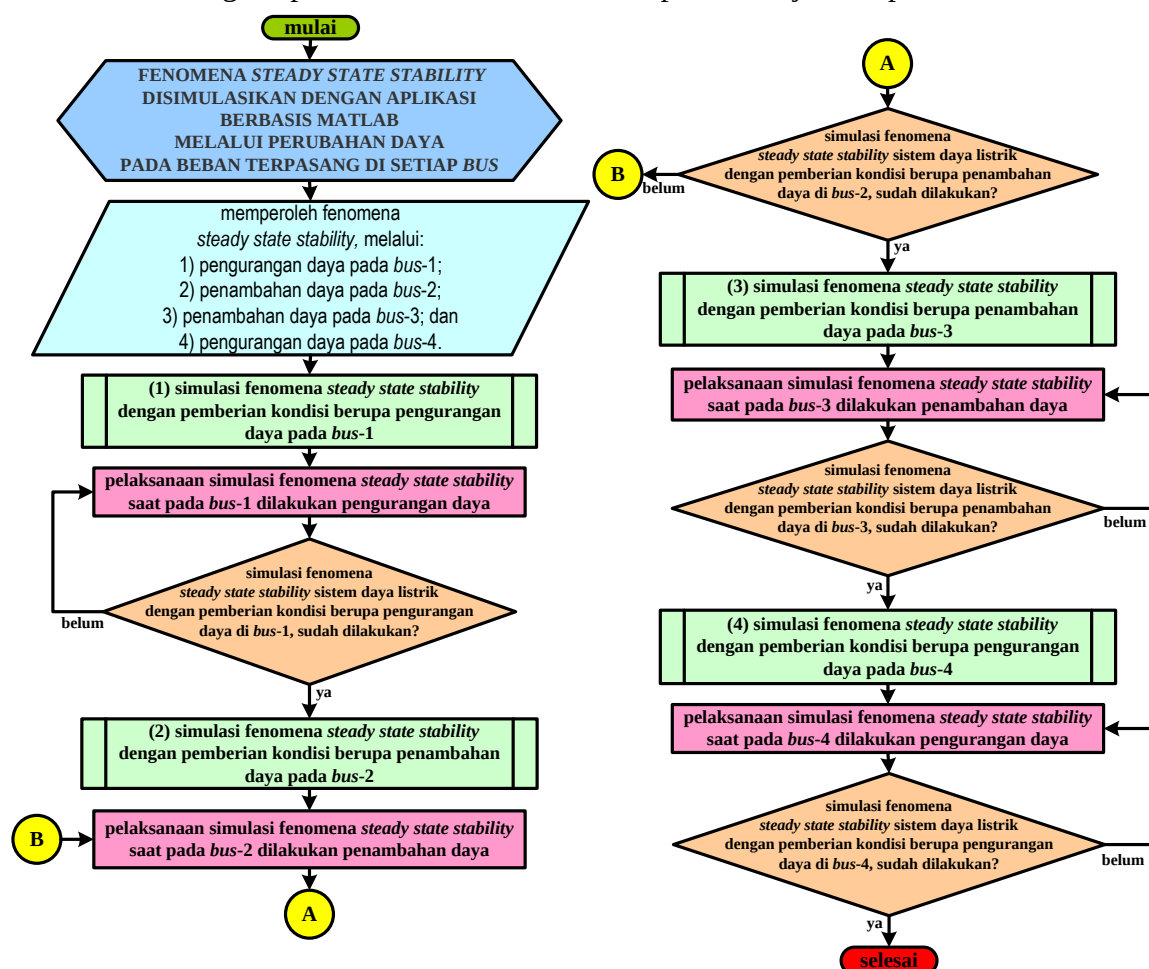
Telah ditetapkan terhadap bus ke-1 sebagai bus ayun, maka nilai pembangkitan disesuaikan setelah sistem beroperasi. Pelaksanaan simulasi fenomena *steady state stability* melalui pengubahan variabel nilai daya beban terpasang setiap bus dan keterpengaruhannya terhadap masing-masing mesin. Perubahan nilai daya beban terpasang setiap bus dilakukan secara bergantian dengan bantuan aplikasi berbasis *MATLAB* [2-4]. Struktur sintaks program untuk simulasi fenomena *steady state stability* [1], seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

```
% Perhitungan tegangan keluaran dari masing-masing mesin
E1=V1+I1*X1 % Perhitungan tegangan pada Mesin 1
E2=V2+I2*X2 % Perhitungan tegangan pada Mesin 2
E3=V3+I3*X3 % Perhitungan tegangan pada Mesin 3
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 1
disp(' Hasil Eksekusi')
Pmax1=abs(E1)*V1/X1, d01=asin(Pm1/Pmax1) %Daya maksimum
Ps1=Pmax1*cos(d01) %Koefisien Daya
Sinkronisasi
wn1=sqrt(pi*60/H1*Ps1) %Undamped frequency of
oscillation
z1=D1/2*sqrt(pi*60/(H1*Ps1)) %Damping ratio
wd1=wn1*sqrt(1-z1^2), fd1=wd1/(2*pi) %Damped frequency
oscillation
taul=1/(z1*wn1) %Waktu tetap
th1=acos(z1) %Sudut fase Tetap
Dd01=10*pi/180 %Initial angle in radian
t1=0:.01:1; % time interval
Dd1=Dd01/sqrt(1-z1^2)*exp(-z1*wn1*t1).*sin(wd1*t1+th1); %
perubahan sudut rotor
d1=(d01+Dd1)*180/pi; %Power angle in degree
Dw1=-wn1*Dd01/sqrt(1-z1^2)*exp(-z1*wn1*t1).*sin(wd1*t1); %
perubahan kecepatan putar sudut rotor
f1=f01+Dw1/(2*pi); %Frekuensi (Hz)
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 2
Pmax2=abs(E2)*V2/X2, d02=asin(Pm2/Pmax2) %Daya maksimum
Ps2=Pmax2*cos(d02) %Koefisien Daya Sinkron
wn2=sqrt(pi*60/H2*Ps2) %Undamped frequency of
oscillation
z2=D2/2*sqrt(pi*60/(H2*Ps2)) %Damping ratio
wd2=wn2*sqrt(1-z2^2), fd2=wd2/(2*pi) %Damped frequency oscill
tau2=1/(z2*wn2) %Waktu tetap
th2=acos(z2) %Sudut fase Teta
Dd02=10*pi/180 %Initial angle in radian
Dd2=Dd02/sqrt(1-z2^2)*exp(-z2*wn2*t1).*sin(wd2*t1+th2);

% perubahan sudut rotor
d2=(d02+Dd2)*180/pi; %Power angle in degree
Dw2=-wn2*Dd02/sqrt(1-z2^2)*exp(-
z2*wn2*t1).*sin(wd2*t1);%perubahan kecepatan putar sudut rotor
f2=f02+Dw2/(2*pi); %Frekuensi (Hz)
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 3
Pmax3=abs(E3)*V3/X3, d03=asin(Pm3/Pmax3) %Daya maksimum
Ps3=Pmax3*cos(d03) %Koefisien Daya Sinkron
wn3=sqrt(pi*60/H3*Ps3) %Undamped frequency of
oscillation
z3=D3/2*sqrt(pi*60/(H3*Ps3)) %Damping ratio
wd3=wn3*sqrt(1-z3^2), fd3=wd3/(2*pi) %Damped frequency oscill
tau3=1/(z3*wn3) %Waktu tetap
th3=acos(z3) %Sudut fase Teta
Dd03=10*pi/180 %Initial angle in radian
Dd3=Dd03/sqrt(1-z3^2)*exp(-z3*wn3*t1).*sin(wd3*t1+th3);
d3=(d03+Dd3)*180/pi; %Power angle in degree
Dw3=-wn3*Dd03/sqrt(1-z3^2)*exp(-z3*wn3*t1).*sin(wd3*t1);
f3=f03+Dw3/(2*pi); %Frekuensi (Hz)
% pencetakan grafik perubahan sudut, perubahan kecepatan sudut
dan perubahan frekuensi
subplot(4,1,2), plot(t1,Dd1,t1,Dd2,t1,Dd3), grid % Grafik
Perubahan sudut rotor mesin 1
xlabel('t (sec)'), ylabel('Delta Rotor Angle`in (degree)')
subplot(4,1,4), plot(t1,f1,t1,f2,t1,f3), grid % Grafik perubahan
sudut rotor mesin 2
xlabel('t (sec)'), ylabel('Frekuensi in (Hz)')
subplot(4,1,3), plot(t1,Dw1,t1,Dw2,t1,Dw3), grid % Grafik
perubahan sudut rotor mesin 3
xlabel('t (sec)'), ylabel('Delta Omega in (rad/sec)')
subplot(4,1,1), plot(t1,d1,t1,d2,t1,d3), grid % Grafik perubahan
sudut rotor mesin 3
xlabel('t (sec)'), ylabel('Rotor Angle in (degree)')
subplot(111)
disp('*****Grafik 1*****')
disp('')
disp('***** END *****')
```

Gambar 3. Struktur sintaks program untuk simulasi fenomena *steady state stability*

Tahapan-tahapan dalam pelaksanaan simulasi terhadap fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik dilakukan dengan penetapan nilai-nilai asumsi untuk proses simulasi, algoritma dan sintaks pada pembuatan struktur program digunakan aplikasi *MATLAB* [2-4], dan pelaksanaan simulasi melalui eksekusi terhadap program. Diagram alir pelaksanaan simulasi terhadap keberadaan fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik yang disimulasikan dengan aplikasi berbasis *MATLAB*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir pelaksanaan simulasi terhadap keberadaan fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik yang disimulasikan dengan aplikasi berbasis MATLAB

Dalam simulasi fenomena *steady state stability* ini dibuat dengan kondisi (a) pengurangan daya di *bus-1*, (b) penambahan daya di *bus-2*, (c) penambahan daya di *bus-3*, dan (d) pengurangan daya di *bus-4*.

Perubahan nilai beban berupa pengurangan daya aktif dan reaktif dari $P = 42,50$ MW dan $Q = 203,8$ MVar menjadi $P = 25,00$ MW dan $Q = 125,5$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-1

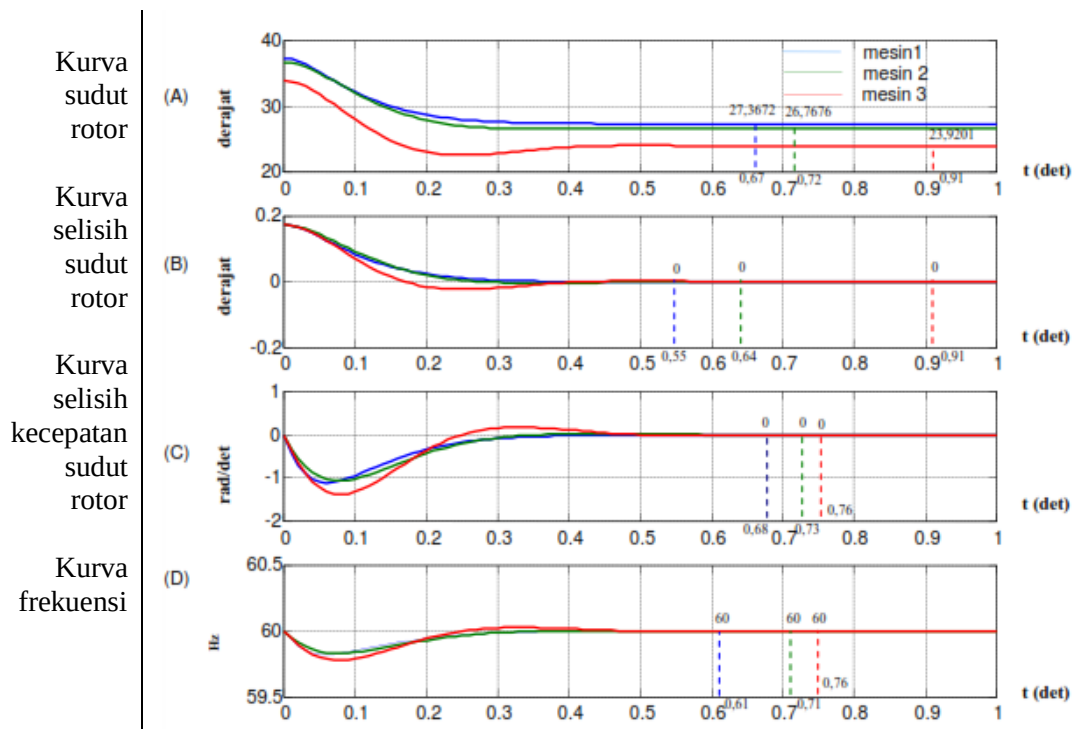
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 4 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan nilai daya di bus-1. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	17,93	179,76	25,50	125,5
2	1,025	5,464	45,00	176,20	11,21	122,6
3	1,030	3,912	50,00	239,05	26,63	171,4
4	0,514	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			112,93	595,01	105,02	567,00

Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-1

Berdasarkan Gambar 5 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Pengurangan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-1 (dari $P = 42,50$ MW dan $Q = 203,8$ MVar menjadi $P = 25,00$ MW dan $Q = 125,5$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Sejumlah fenomena akibat pengurangan nilai daya di bus-1

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	27,3672	8,1526	lebih kecil
	2	26,7676	26,7676	0	Tetap
	3	23,9201	23,9201	0	Tetap
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,55	0,07	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,91	0,23	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,68	0,12	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,76	0	tetap
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,61	0,07	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	lebih lambat
	3	0,76	0,76	0	tetap

2.2. Fenomena *Steady State Stability* dengan Data Perubahan Nilai Daya Beban di Bus--2

Perubahan nilai beban berupa penambahan daya aktif dan reaktif dari $P = 11,21$ MW dan $Q = 122,6$ MVar menjadi $P = 40,00$ MW dan $Q = 200$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-2

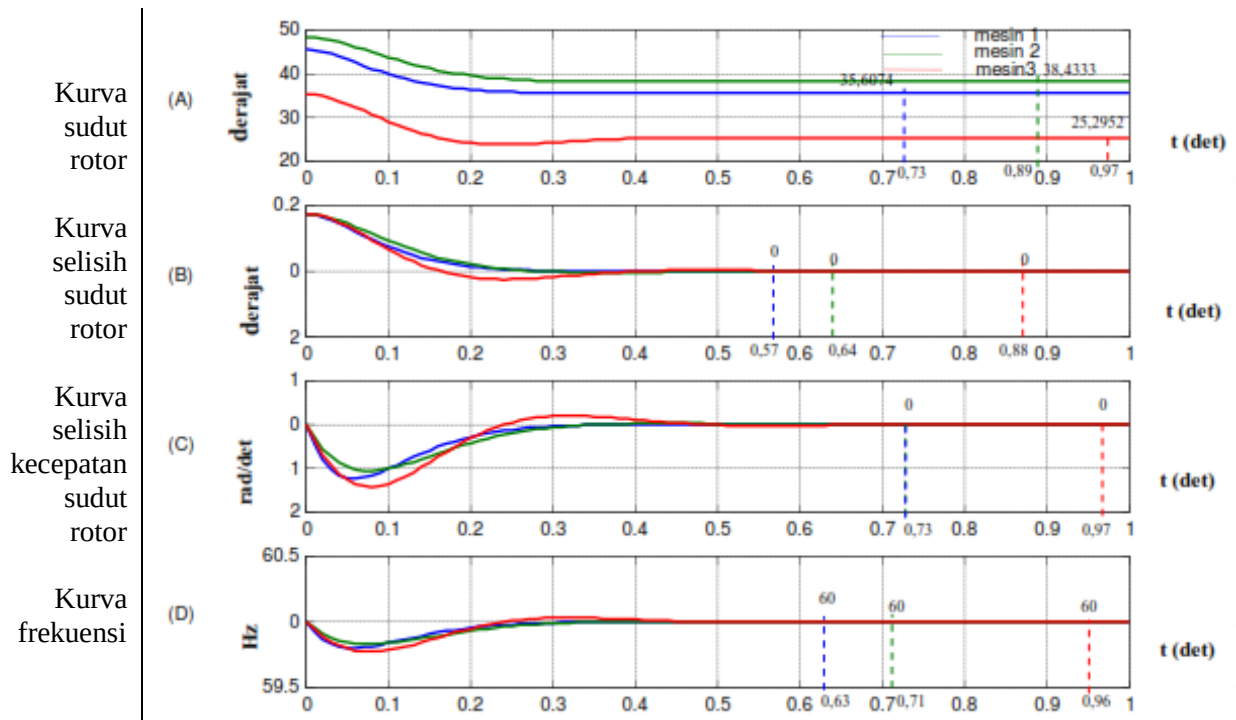
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	40,00	200,00	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 7 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-2. Nilai daya mekanis hasil perhitungan dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai daya mekanis hasil perhitungan dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	$Mag.$ (p.u.)	$Ang.$ (deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	73,60	275,64	42,50	203,8
2	1,025	-2,137	45,00	282,56	40,00	200,00
3	1,030	-1,120	50,00	269,23	26,63	171,4
4	0,325	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			168,60	827,43	151,31	722,70

Penggunaan Tabel 8 diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-2

Berdasarkan Gambar 6 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Penambahan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-2 (dari $P = 11,21$ MW dan $Q = 122,6$ MVar menjadi $P = 40,00$ MW dan $Q = 200$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-2

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	35,6074	0,0876	lebih besar
	2	26,7676	38,4333	11,6657	lebih besar
	3	23,9201	25,2952	1,3751	lebih besar
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,57	0,09	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,88	0,20	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,97	0,21	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,63	0,09	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,96	0,20	lebih lambat

2.3. Fenomena *Steady State Stability* dengan Data Perubahan Nilai Daya Beban di Bus--3

Perubahan nilai beban berupa penambahan daya aktif dan reaktif dari $P = 26,63$ MW dan $Q = 171,4$ MVar menjadi $P = 35,75$ MW dan $Q = 195,5$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-3

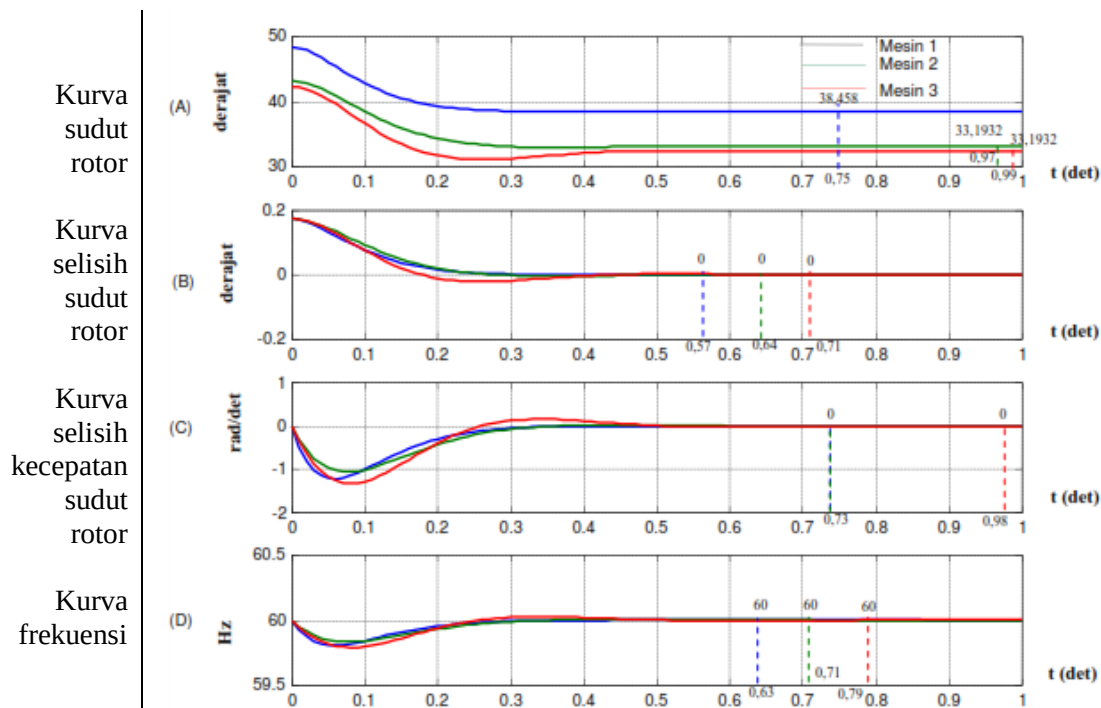
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	35,75	195,5	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 10 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-3. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	64,40	303,52	42,50	203,8
2	1,025	5,464	45,00	231,56	11,21	122,6
3	1,030	3,912	50,00	328,09	35,75	195,5
4	0,114	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			159,40	863,17	131,64	669,40

Penggunaan Tabel 11, diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Gambar 7. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-3

Berdasarkan Gambar 7 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Penambahan daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus 3 (dari $P = 26,63$ MW dan $Q = 171,4$ MVar menjadi $P = 35,75$ MW dan $Q = 195,5$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-3

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	38,4580	2,9382	lebih besar
	2	26,7676	33,1932	6,4256	lebih besar
	3	23,9201	32,3113	8,3912	lebih besar
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,57	0,09	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,71	0,03	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,63	0,09	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,79	0,03	lebih lambat

2.4. Fenomena *Steady State Stability* dengan Data Perubahan Nilai Daya Beban di Bus--4

Perubahan nilai beban berupa pengurangan daya aktif dan reaktif dari $P = 42,18$ MW dan $Q = 147,5$ MVar menjadi $P = 10,15$ MW dan $Q = 60,75$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Nilai daya setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-4

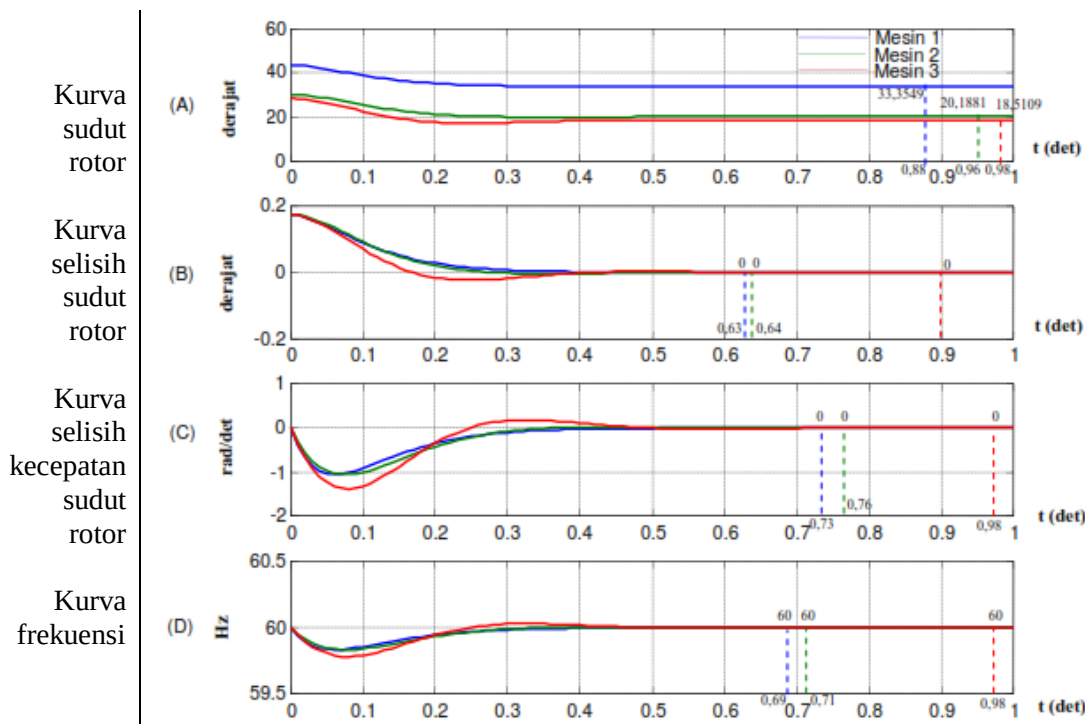
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	10,15	60,75	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 13 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-4. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	-2,18	219,65	42,50	203,8
2	1,025	8,836	45,00	124,71	11,21	122,6
3	1,030	7,622	50,00	180,21	26,63	171,4
4	0,887	5,360	-	-	10,15	60,75
Total:			92,82	524,57	90,49	558,55

Penggunaan Tabel 14, diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Gambar 8. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-4

Berdasarkan Gambar 8 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Pengurangan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-4 (dari $P = 42,18$ MW dan $Q = 147,5$ MVar, menjadi $P = 10,15$ MW dan $Q = 60,75$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-4

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	33,3549	2,1649	lebih kecil
	2	26,7676	20,1882	6,5794	lebih kecil
	3	23,9201	18,5109	5,4092	lebih kecil
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,63	0,15	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,90	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,76	0,08	lebih lambat
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,69	0,15	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat

2.5. Ringkasan Hasil Simulasi Fenomena *Steady State Stability* dengan Data Perubahan Nilai Daya Beban di setiap Bus

Berpedoman kepada sejumlah Tabel yang meliputi Tabel 6, Tabel 9, Tabel 12, dan Tabel 15 ditunjukkan, bahwa terdapat kemunculan sejumlah fenomena, yaitu (a) perubahan nilai sudut rotor saat pencapaian stabil, (b) pencapaian waktu saat delta rotor mencapai 0 derajat (stabil), (c) pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil), dan (d) pencapaian waktu saat nilai frekuensi mencapai 60 Hz. (stabil). Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar (dalam hal ini mesin-3) butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban.

3. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi keseluruhan, maka diperoleh fenomena-fenomena pada pemberian simulasi perubahan daya pada beban terpasang di setiap bus sesuai tujuan penelitian, yaitu (a) Daya aktif pada mesin-2 dan mesin-3 selalu tetap, tetapi daya reaktif berubah untuk pengaturan tegangan, agar tegangan generator sama dengan tegangan sistem; (b) Nilai sudut rotor berbanding lurus dengan perubahan daya beban, jika beban daya naik maka nilai sudut naik begitupun sebaliknya, sehingga kondisi tersebut berpengaruh kepada perubahan daya mekanis, yaitu saat keadaan stabil daya mekanis sesuai kondisi daya beban, dimana daya mekanis tersebut berpengaruh terhadap nilai sudut rotor; (c) Pencapaian waktu stabil selisih sudut rotor (delta rotor) dan waktu stabil frekuensi mesin-2 tidak dipengaruhi oleh perubahan daya beban; (d) Perubahan daya beban berakibat pencapaian waktu stabil selisih kecepatan sudut rotor (delta omega) relatif lebih lambat; (e) Generator dengan kapasitas besar perlu waktu pencapaian stabil lebih lambat, dalam hal ini kapasitas mesin-1 lebih kecil dari mesin-2 dan lebih kecil dari mesin-3. Rasio peredaman (*damping ratio*) berbanding terbalik dengan nilai daya beban, jika daya beban naik maka rasio peredaman berkurang; dan (f) Sistem kembali stabil pada saat mesin yang terakhir capai waktu stabil, yaitu dalam hal kesamaan frekuensi, urutan fase, dan sudut fase. Dalam simulasi ini, setelah mesin-3 capai waktu stabil.

Daftar Pustaka

- [1] A. Goeritno, & T. Hendrawan. "Aplikasi Berbasis MATLAB untuk Simulasi Fenomena Steady State Stability," di Prosiding Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri (SENIATI) 2019, Vol. 5, (pp. 1-11).
- [2] J. Kiusalaas, 2005. "Introduction to MATLAB," in Numerical Methods in Engineering with MATLAB. New York, NY: Cambridge University Press, pp. 1-27.
- [3] D. McMahon, 2007. "The MATLAB Environment," in MATLAB Demystified. New York, NY: McGraw-Hill Companies, pp. 1-14.
- [4] H. Moore, 2012. "About MATLAB," in MATLAB for Engineers, Third Edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., pp. 1-8.
- [5] W.K. Ang. Energy Function for Power Stability Assessment, Thesis, the University of Queensland, Brisbane, 2003.
- [6] D. Das, 2006. Electrical Power Systems. New Delhi: New Age International Limited, pp. 276-306.
- [7] P.S.R. Murthy, 2007. Power System Analysis. Hyderabad: BS Publication, pp. 259-289.
- [8] J.J. Grainger, & W.D. Stevenson, 1994. Power System Analysis. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., pp. 695-747.
- [9] H. Saadat, 1999. Power System Analysis. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., pp. 460-526.