

## **BAB 4**

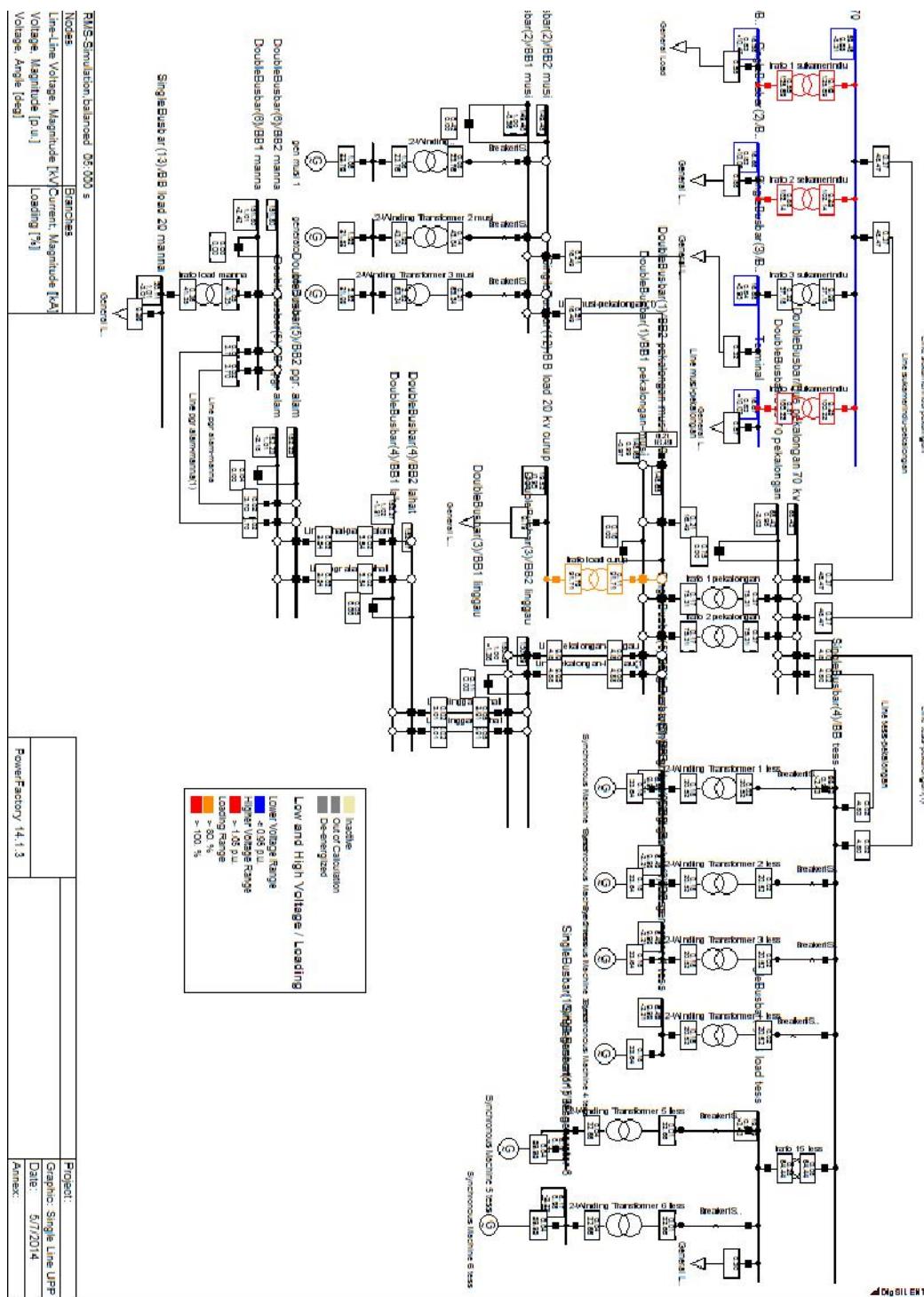
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Kestabilan Sistem Tenaga Sebelum dan Sesudah Pemasangan DG Sebelum**

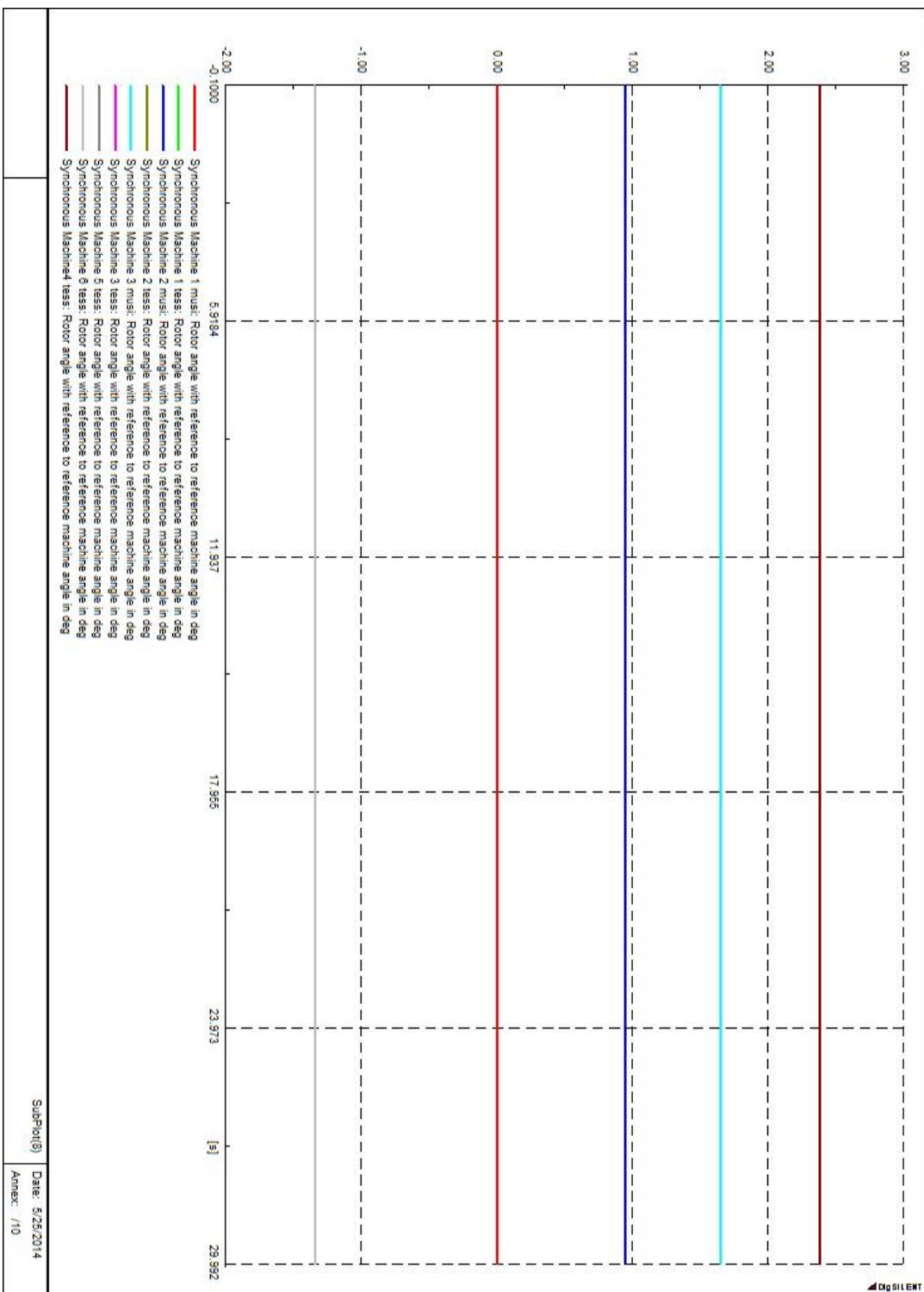
##### **Diberi Simulasi Gangguan**

###### **4.1.1 Kestabilan Sistem Tenaga Sebelum Pemasangan DG**

Pada simulasi berikut ini masih dengan sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu tanpa menggunakan tambahan *distributed generation* dan tanpa diberi gangguan hubung singkat tiga fasa, dengan sistem operasi normal seperti pada Gambar 4.1 dimana pada sistem pembangkitan ini terdapat unit pembangkitan PLTA Musi yang terdiri atas tiga unit pembangkit berkapasitas maksimal 70 MW dengan generator referensi sistem tenaga listrik pada init generator satu dan Unit PLTA Tess dengan empat unit pembangkit berkapasitas 4.9 MW serta dua unit pembangkit dengan kapasitas 630 kW yang pada simulasi diasumsikan sebagai DG yang sudah terpasang secara permanen pada sisi 20 kV sistem distribusi wilayah Tess dalam sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dan secara keseluruhan memikul beban puncak wilayah Bengkulu sebesar 110.86 MW, untuk itu kestabilan sistem tenaga sangat diperlukan untuk menjamin pembangkit bekerja dalam kondisi optimal. Simulasi terhadap kestabilan sudut rotor generator utama pada saat beroprasi dalam keadaan normal menggunakan program simulasi kestabilan Digsilent dengan rangkaian simulasi yang dapat dilihat pada Gambar 4.1, maka diperoleh hasil respon kestabilan sudut rotor generator – generator baik generator unit PLTA Musi dan generator unit PLTA Tess pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1 *Single line* simulasi sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu tanpa menggunakan *distributed generation*

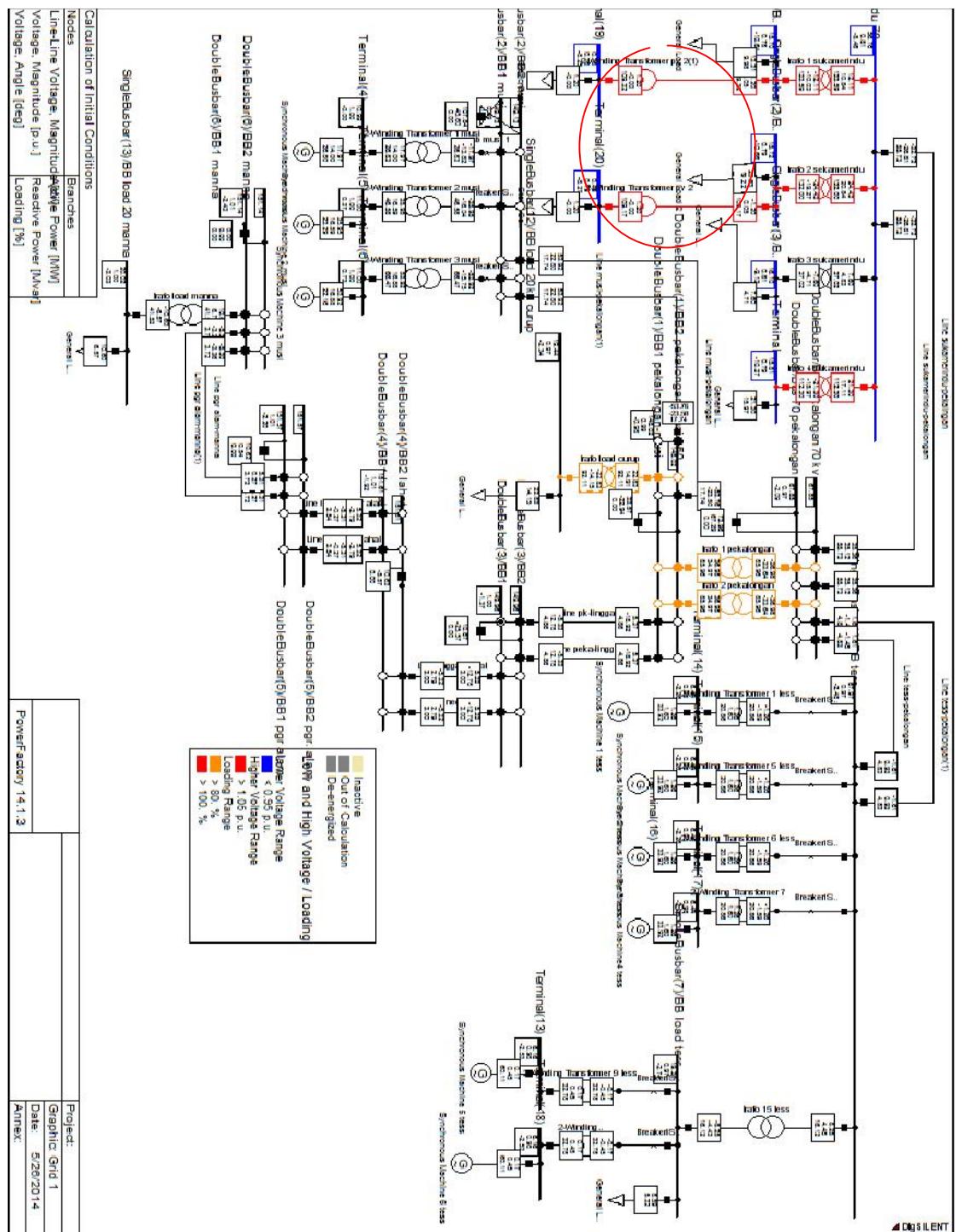


Gambar 4.2 Grafik Kestabilan sudut rotor generator utama Sistem Tenaga listrik wilayah Bengkulu Tanpa DG

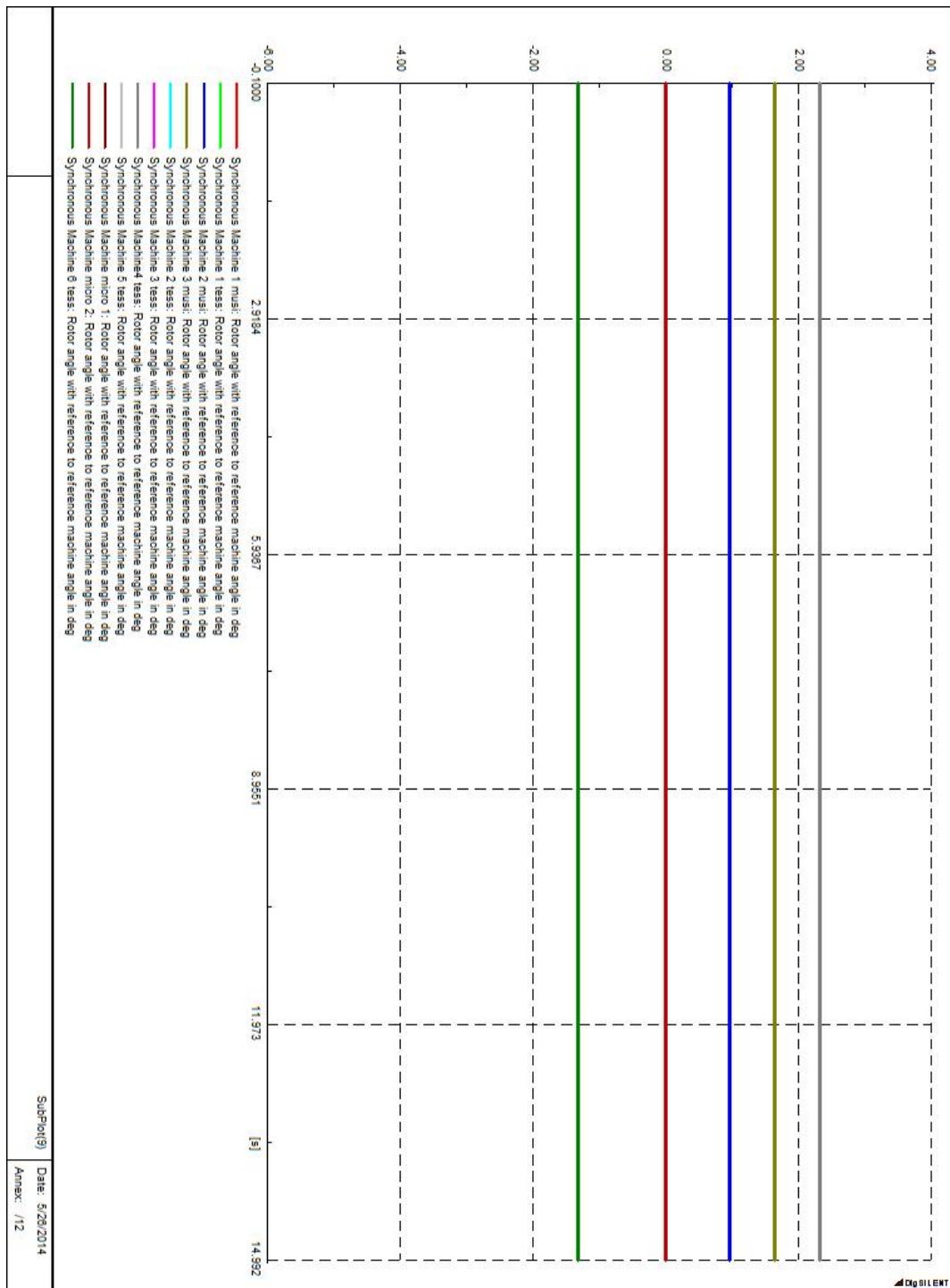
Setelah dilakukan simulasi seperti pada Gambar 4.1 diperoleh hasil simulasi Gambar 4.2 dimana seluruh generator utama PLTA Musi dan PLTA Tess beroprasi dalam keadaan yang stabil atau rotor mesin beroprasi dalam keadaan kerja dengan kecepatan konstan, arus dan tegangan serta frekuensi yang normal tanpa adanya gangguan atau sebelum diberikan gangguan tiga fasa.

#### **4.1.2 Kestabilan Sistem Tenaga Setelah Penambahan DG**

*Distributed generation* merupakan konsep sistem tenaga listrik yang tidak terpusat, memiliki kapasitas kecil dan lokasi penempatan dekat dengan pusat beban atau konsumen. Pada Gambar 4.3 merupakan simulasi sistem tenaga dengan tambahan DG, penambahan DG dilakukan secara bertingkat dimulai pada bus sukamerindu dengan injeksi pada sisi 20 kV trafo 1 dan trafo 2 masing-masing 1.2 MW *photovoltaic* dan kemudian pada bus beban pekalongan 2 x 700 kW *microhydro*, sehingga total penambahan DG sebanyak empat unit. Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pada kondisi tanpa diberi gangguan 3 fasa atau saat sistem bekerja pada kondisi beban dan keadaan normal dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dengan penambahan DG sebanyak dua unit *photovoltaic*.



Gambar 4.3 Single line simulasi sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan tambahan DG  
*phothovoltaic*

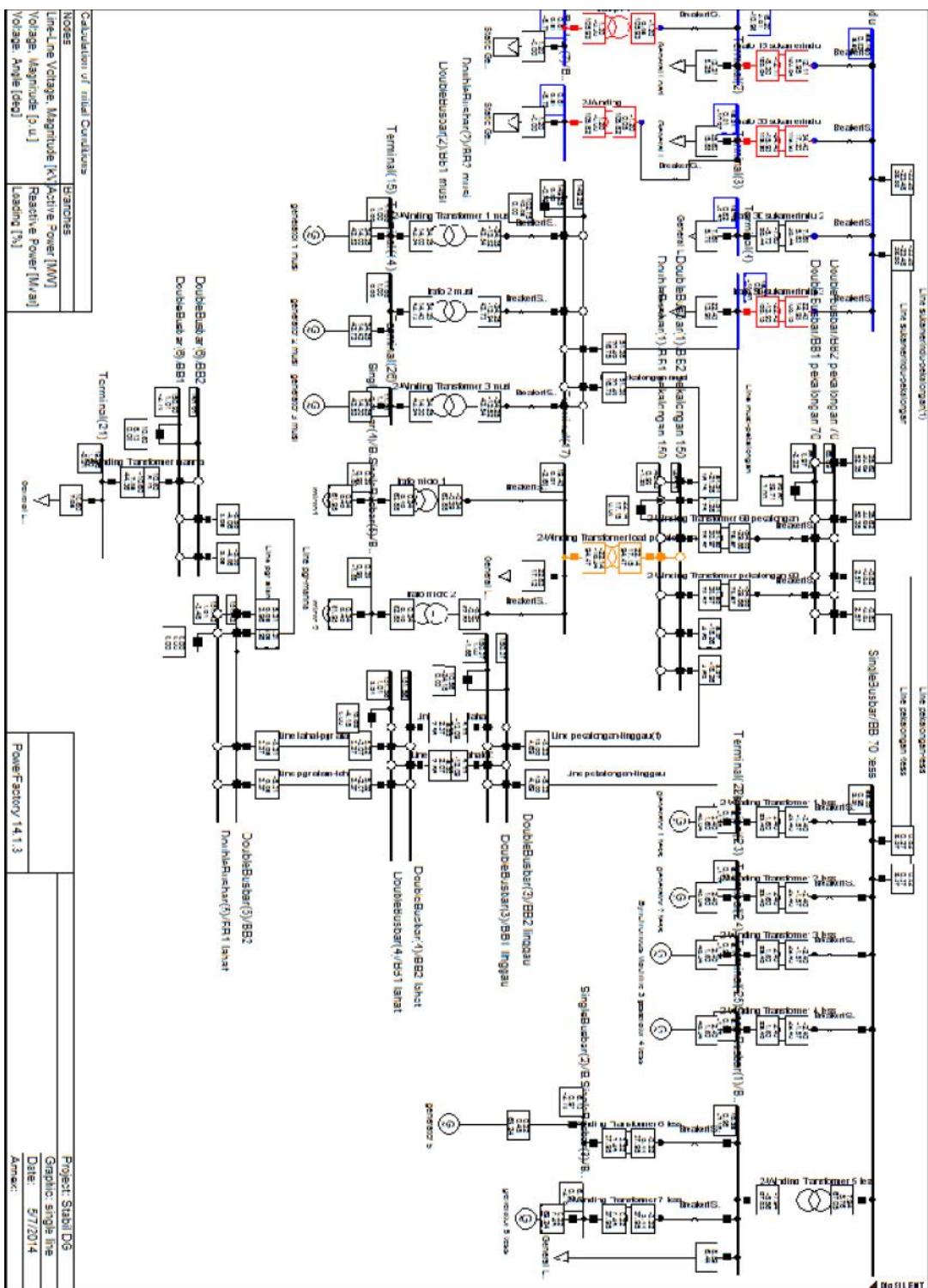


Gambar 4.4 Grafik hasil simulasi terhadap respon sudut rotor generator utama sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan tambahan dua unit *photovoltaic*

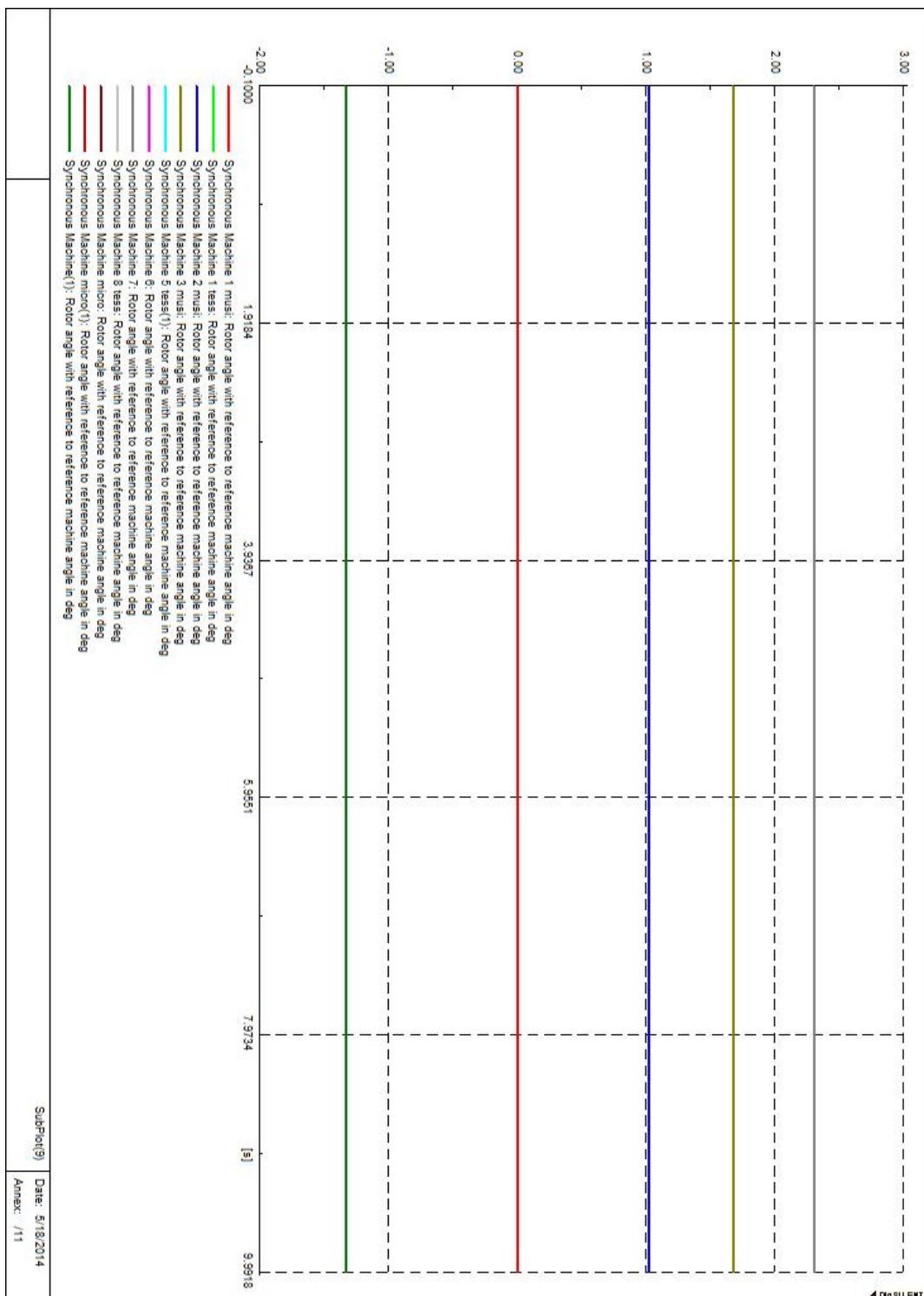
Simulasi dengan menggunakan dua Unit DG tambahan tidak mengganggu kestabilan sudut generator utama, hal ini dapat dilihat pada grafik hasil simulas

pada Gambar 4.4 dimana keseluruhan generator menunjukkan kondisi yang stabil terhadap penambahan DG *photovoltaic*. Selain itu penambahan DG juga berdampak pada trafo distribusi unit 1 dan unit 2 sukamerindu, dengan penambahan unit DG 1.2 MW pada masing-masing bus sukamerindu yang mendapat injeksi DG, besar beban yang harus ditanggung trafo distribusi unit 1 dan unit 2 teralihkan sebesar 1.2 MW oleh suplai dari unit pembangkit DG.

Selanjutnya pembangkit DG pada simulasi ditingkatkan menjadi empat unit pada bus beban pekalongan dengan tambahan DG berupa unit *microhydro* dengan kapasitas  $2 \times 700$  kW. Simulasi yang dilakukan tanpa memberikan gangguan tiga fasa dengan rangkaian simulasi seperti pada Gambar 4.5 dan hasil simulasi menggunakan program Digsilent dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Single line simulasi sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan penambahan *distributed generation* sebanyak empat unit



Gambar 4.6 Grafik hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor generator utama menggunakan tambahan DG empat unit

Dari simulasi yang telah dilakukan dengan hasil pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa dengan penambahan dua unit DG *microhydro* 2 x 700 kW tidak

mengganggu kestabilan dari unit-unit pembangkit utama pada saat beroperasi dalam kondisi beban normal tanpa adanya gangguan baik gangguan transmisi, distribusi ataupun gangguan dari pembangkit itu sendiri. Penambahan dua unit DG *microhydro* juga membantu trafo distribusi pekalongan dalam memikul beban konsumen sebesar 1.4 MW.

#### **4.2 Analisis Kestabilan Sistem Tenaga Setelah Diberi Gangguan Transien**

##### **4.2.1 Sistem Tanpa Tambahan DG**

Sistem pembangkitan wilayah Bengkulu memiliki kestabilan sudut generator yang stabil, hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi yang telah dilakukan menggunakan program *digsilent* pada Gambar 4.2 dimana pada simulasi tersebut belum diberikan gangguan tiga fasa. Kemudian pada sistem diberikan gangguan tiga fasa pada bus beban 20kV pada unit trafo 3 sukamerindu dimana pada simulasi diberikan waktu pemutusan gangguan di set pada 100 milidetik, 250 milidetik dan 500 milidetik yang mengikuti acuan dari waktu pemutusan relay PLN 0,2 detik dengan hasil semulasi pada Gambar 4.3 dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik dan diperoleh data hasil simulasi pada Tabel 4.1.

Untuk analisa secara perhitungan terhadap waktu pemutusan gangguan kritis pada unit pembangkit PLTA Musi sebuah generator serempak mempunyai konstanta kelembaman  $H = 4 \text{ MJ/MVA}$  dan reaktansi transien sumbu langsung  $X_d' = 0.24 \text{ pu}$ , dihubungkan ke *infinite bus* melalui rangkaian *reaktif* murni dan  $V = 1 \text{ pu}$ .

adalah sebagai berikut.

Reaktansi seri diantara terminal dan rel adalah

$$x = 0.08 + 0.015 + 0.0625 + 0.173 + 0.04 = 0.366 \text{ per satuan}$$

Daya keluaran generatot 1,0 per satuan maka

$$\frac{|V_t||V|}{X} \sin \alpha = \frac{(1,0)(1,0)}{0,366} \sin \alpha = 1,0$$

$$\alpha = \sin^{-1} 0.366 = 21,46^\circ$$

Tegangan terminal adalah

$$V_t = 1\angle 21,46^\circ = 0.93 + 0,36j$$

Arus keluaran generator dihitung sebagai

$$I = \frac{1.0\angle 21,46 - 1.0\angle 0}{0.36j} = 1.0 + 0.19j = 1.03\angle 10,78 \text{ per satuan}$$

Dan tegangan dalam peralihan kemudian didapatkan sebagai

$$\begin{aligned} E &= (0.93 + 0.36) + j(0.08)(1.0 + 0.19j) \\ &= 0.91 + 0.44j = 1.01\angle 25,68 \end{aligned}$$

Persamaan sudut daya yang menghubungkan tegangan dalam peralihan dan tegangan rel tak hingga V ditentukan oleh keseluruhan reaktansi seri

$$X = 0.08 + 0.08 + 0.0105 + 0.0625 + 0.173 + 0.04 = 0.446 \text{ per satuan}$$

Persamaan yang dikehendaki ialah

$$P_e = \frac{(1.01)(1.0)}{0.446} \sin \delta = 2.26 \sin \delta \text{ per satuan}$$

Persamaan sudut daya adalah

$$P_e = 2.26 \sin 25,68 \text{ per satuan}$$

Dan sudut rotor awal

$$\delta_0 = 25,68^\circ = 0.44 \text{ rad listrik}$$

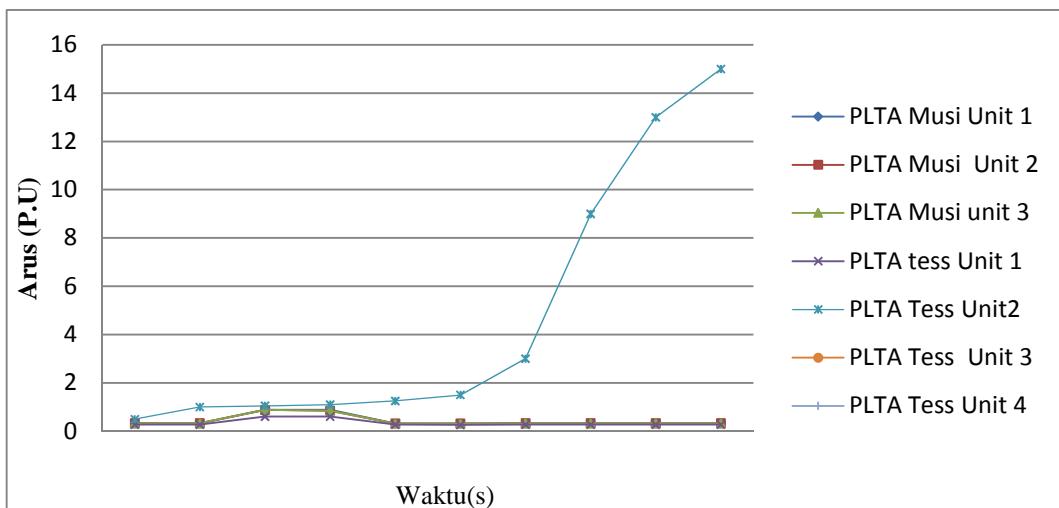
Dan daya masukan mekanis  $P_m$  adalah 1,0 per satuan. Karena itu dari Persamaan (2.7) diperoleh

$$\begin{aligned} \delta_{cr} &= \cos^{-1}((\pi - 2x0.44) \sin 25,68 - \cos 25,68) \\ &= 85,47 = 1.49 \text{ rad listrik} \end{aligned}$$

Untuk sudut pemutusan kritis dan berdasarkan Persamaan (2.9) diperoleh waktu pemutusan kritis

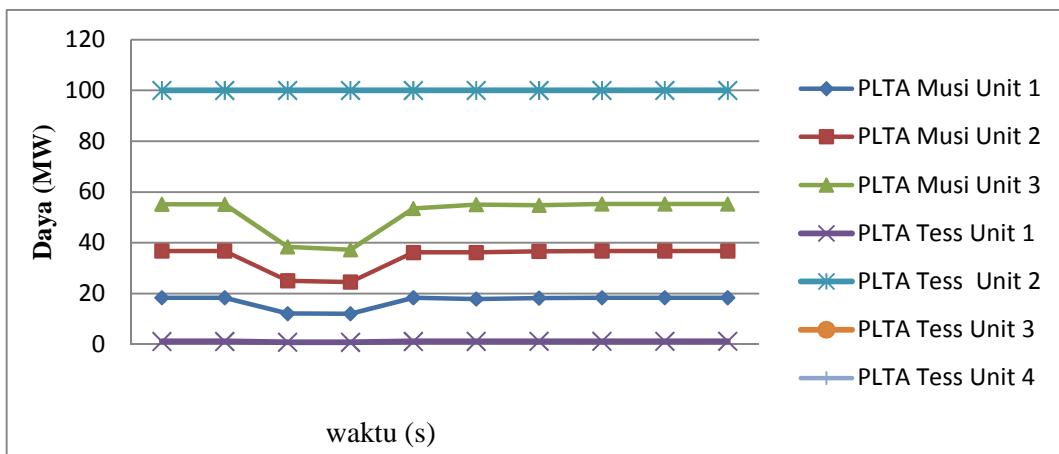
$$\begin{aligned} t_{cr} &= \sqrt{\frac{4x4(1.49 - 0,44)}{314.15x1}} \\ &= 0.231 \text{ detik} \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diamati perubahan yang terjadi terhadap arus, daya aktif dan daya reaktif dari generator utama pada saat detik pertama terjadinya gangguan dan sesaat setelah dilakukan pemutusan terhadap gangguan tiga fasa yang terjadi dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik pada Gambar 4.8, Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



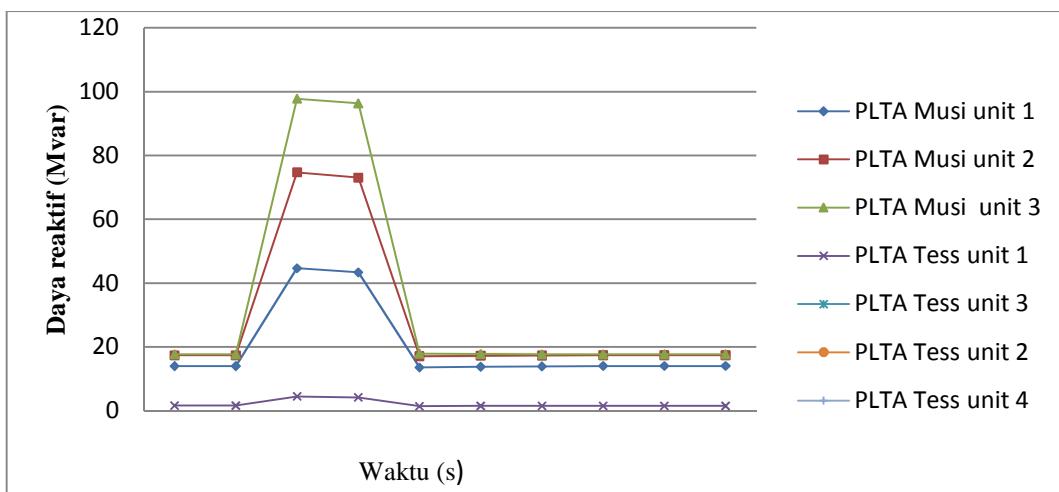
Gambar 4.7 Grafik Perubahan Arus Pembangkit tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Gambar 4.7 memperlihatkan bagaimana pengaruh lamanya pemutusan gangguan terhadap arus pada generator utama, pada saat detik pertama terjadinya gangguan seperti generator unit PLTA Musi mencapai 0.88 pu dan generator unit PLTA Tess juga mengalami kenaikan arus mencapai 0.5 pu dan tertinggi pada unit PLTA Tess pada unit empat 0.85 pu.



Gambar 4.8 Grafik Perubahan Daya Pembangkit tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Dampak dari gangguan yang terjadi mempengaruhi daya keluaran dari generator, pada unit PLTA Musi terjadi penurunan daya yang cukup besar Gambar 4.8 dari ketiga unit generatoriya berkisar 6-17 MW selama terjadinya gangguan, sedangkan pada unit PLTA Tess penurunan daya keluaran sebesar 0,44 MW dan ketika gangguan diputus pada 100 milidetik sesaat setelah terjadinya gangguan, daya keluaran seluruh generator utama berangsurnaik ke kondisi sebelum terjadinya gangguan.

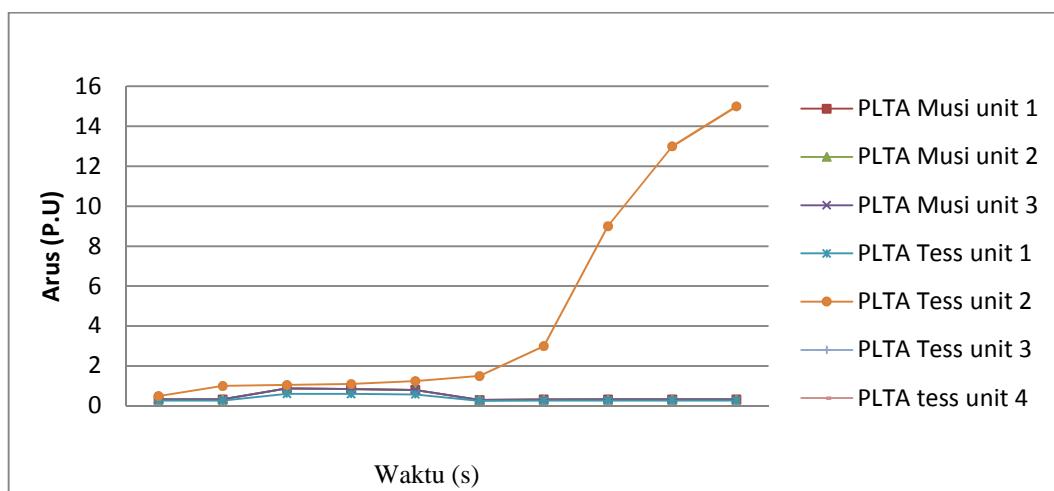


Gambar 4.9 Grafik Perubahan Daya reaktif Pembangkit tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Perubahan daya reaktif generator saat terjadinya gangguan tiga fasa cukup besar seperti pada Gambar 4.9, pada unit generator tiga PLTA Musi mengalami lonjakan daya reaktif hingga 97 Mvar, generator unit dua sebesar 73 Mvar dan unit satu sebesar 44,5 Mvar saat gangguan terjadi, begitu juga terhadap unit

generator PLTA Tess terjadi kenaikan daya reaktif sebesar 4,5 Mvar yang tentunya tidak baik bagi generator itu sendiri jika terjadi dalam waktu yang cukup lama. Dengan waktu pemutusan 100 milidetik sesaat setelah terjadi gangguan, respon kestabilan sudut generator terhadap gangguan tiga fasa yang terjadi masih dalam kondisi yang stabil, hal ini terlihat dari hasil simulasi pada Gambar lampiran 1 dimana lengkung ayunan sudut generator pada grafik hasil simulasi masih menunjukkan kondisi yang stabil

Selanjutnya simulasi dengan letak dan jenis gangguan yang sama pada bus beban trafo unit tiga sukamerindu, simulasi dilakukan dengan pemutusan gangguan lebih lama 250 milidetik yang hasilnya simulasi respon sudut rotor dapat dilihat pada Gambar Lampiran 2 dan data hasil simulasi terhadap arus, daya aktif serta daya reaktif generator utama pada Tabel 4.2. Berdasarkan Tabel 4.2 diperoleh grafik perubahan arus, daya aktif dan daya reaktif generator utama terhadap gangguan tiga fasa yang diberikan dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik.

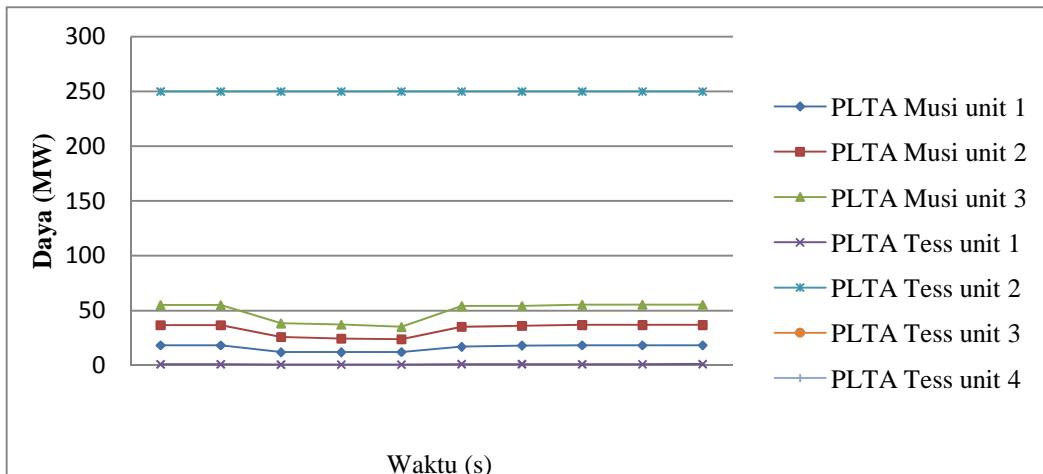


Gambar 4.10 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Dengan waktu pemutusan gangguan sedikit lebih lama yakni 250 milidetik berdampak pada besarnya arus gangguan yang terjadi pada unit – unit generator yang

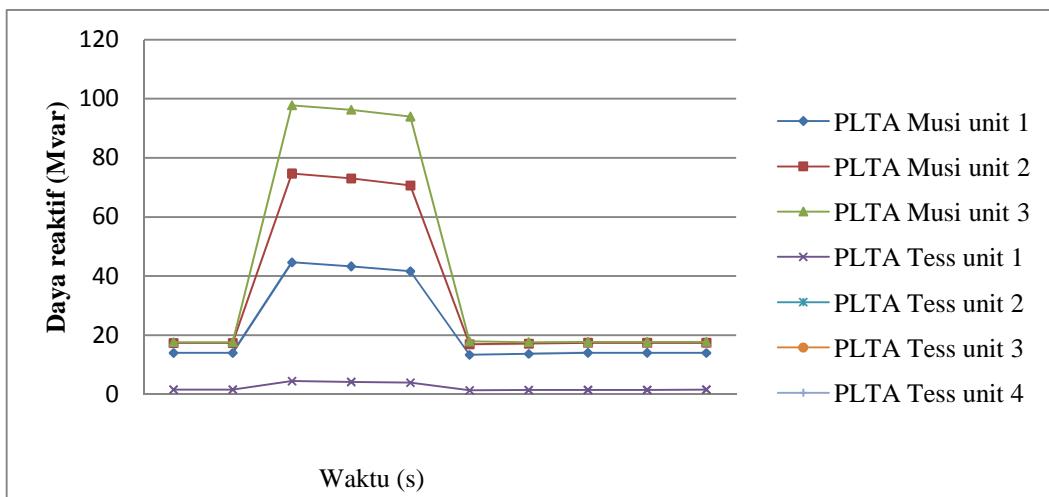
sedang beroprasi seperti pada unit PLTA Musi dan PLTA Tess terjadi kenaikan hingga 0.8 pu seperti pada Gambar 4.10, arus generator kembali normal pada waktu 1,5 detik setelah gangguan diputus pada detik ke 1,25 .

Sedangkan untuk grafik perubahan daya aktif dan daya reaktif dari generator utama pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.



Gambar 4.11 Grafik Perubahan daya aktif pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Berdasarkan grafik Gambar 4.11 dengan waktu pemutusan 250 milidetik semua generator mengalami kehilangan daya yang cukup besar selama gangguan terjadi hingga gangguan tersebut diatasi. Pada unit generator tiga PLTA Musi yang pada saat beroprasi normal memikul beban 55 MW mengalami penurunan daya keluaran menjadi 33,7 MW saat gangguan terjadi begitu juga terhadap unit generator lainnya mengalami penurunan daya dengan penurunan daya yang berbeda pada setiap unit pembangkit.

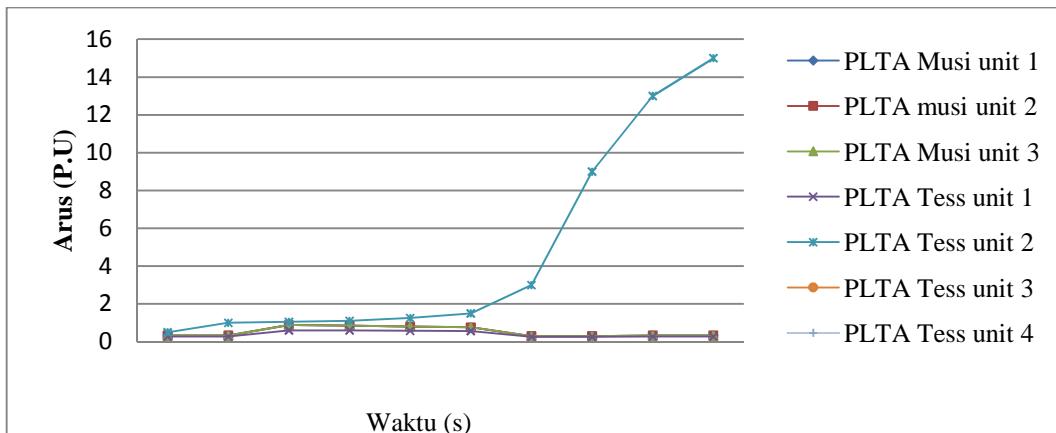


Gambar 4.12 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Gambar 4.13 menunjukkan perubahan daya reaktif yang mengalami kenaikan yang tinggi saat terjadi gangguan dan kembali normal pada detik ke 1,5 setelah gangguan diputuskan pada detik ke 1,25. Pada unit generator PLTA Musi kenaikan daya reaktif hingga 97,8 Mvar selama gangguan terjadi dan unit generator PLTA Tess kenaikan daya reaktif hingga 4,5 Mvar. Dengan waktu pemutusan 250 milidetik, generator unit PLTA Musi masih bias mempertahankan kondisi sudut rotor dalam kondisi yang stabil dan secara analisis perhitungan waktu pemutusan gangguan kritis untuk generator PLTA Musi 0,231 detik, hal ini didukung oleh perangkat pengontrol otomatis yang peka terhadap adanya perubahan tegangan yang menyebabkan osilasi sudut rotor dan untuk unit-unit generator PLTA Tess ketidak stabilan sudut rotor sudah mulai terjadi, hal ini dapat dilihat dari grafik kestabilan sudut rotor Gambar lampiran 3 terhadap gangguan tiga fasa yang diberikan.

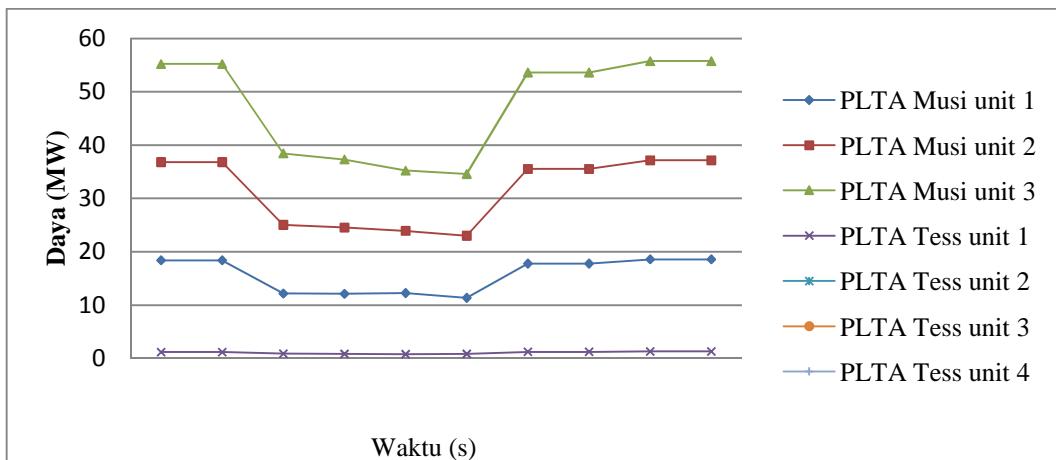
Kemudian pemutusan gangguan pada sistem di seting pada waktu pemutusan 500 milidetik dengan posisi gangguan pada bus beban trafo unit tiga sukamerindu dan diperoleh data hasil simulasi pada Table 4.3 dan hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa pada Gambar lampiran 3, dan grafik perubahan arus gambar 4.13, daya aktif gambar 4.14 serta perubahan daya reaktif terhadap lamanya waktu terjadinya gangguan pada Gambar 4.15.

Berdasarkan Tabel 4.3 diperoleh grafik lamanya pemutusan gangguan terhadap perubahan arus, daya dan daya reaktif.



Gambar 4.13 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

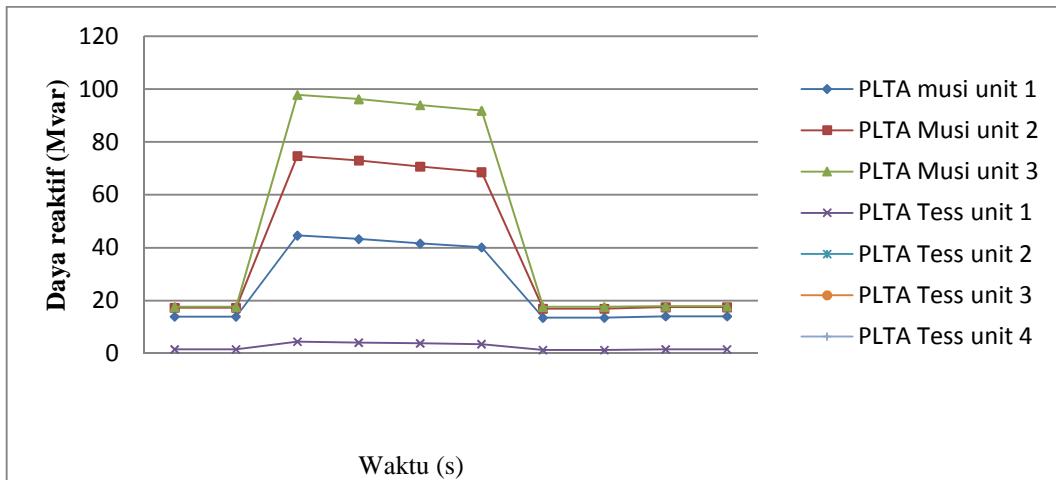
Berdasarkan grafik perubahan arus pada Gambar 4.13 dengan pemutusan gangguan 500 milidetik, arus gangguan pada generator cukup besar 0.88 pu untuk unit pembangkit PLTA Musi dan PLTA Tess dan dalam waktu yang relatif lebih lama hingga gangguan diputus. Kondisi dengan waktu pemutusan yang lama tentunya tidak baik untuk kestabilan generator.



Gambar 4.14 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Gambar 4.14 menunjukkan grafik penurunan daya keluaran unit generator selama terjadinya gangguan dan hingga gangguan tersebut diputus. Penurunan daya keluaran generator berkisar 6-17 MW pada unit pembangkit PLTA Musi sedangkan pada unit pembangkit PLTA Tess penurunan berkisar 0,4 MW,

generator kembali ke posisi seperti sebelum terjadinya gangguan pada detik ketiga setelah gangguan diputus pada detik ke 1,5.



Gambar 4.15 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Daya reaktif pada Gambar 4.15 menunjukkan kenaikan yang tinggi dan dalam waktu yang cukup lama hingga gangguan tersebut diputuskan 500 milidetik sesaat setelah gangguan terjadi, kenaikan daya reaktif mencapai 97 Mvar pada generator unit tiga yang memikul beban 55 MW saat beroprasi normal, generator unit satu 44 Mvar dan generator unit dua 74 Mvar. Sedangkan pada unit PLTA Tess kenaikan daya reaktif mencapai 4,5 Mvar.

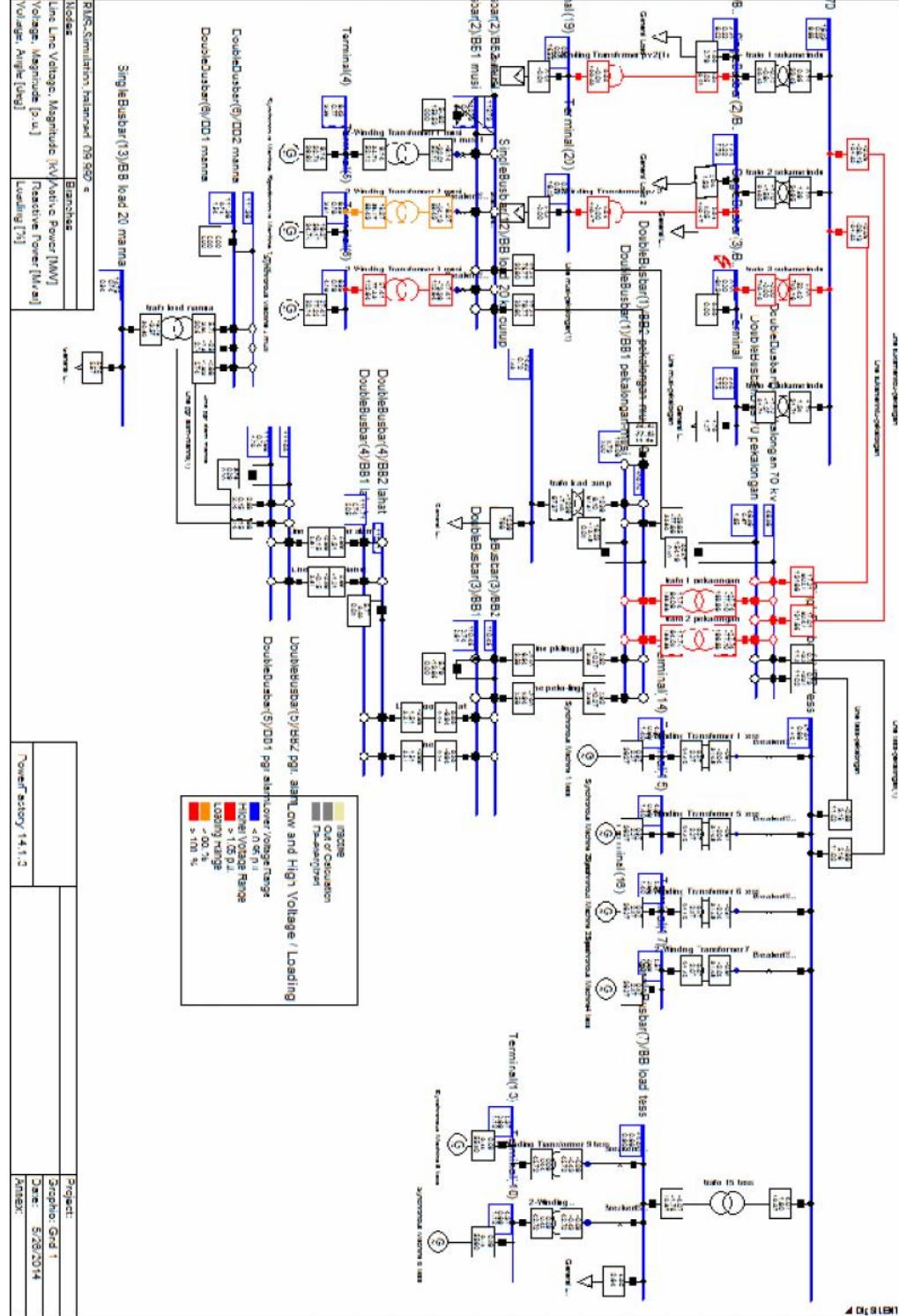
Dengan waktu pemutusan gangguan yang lebih lama dari sebelumnya yaitu 500 milidetik, maka diperoleh respon sudut generator terhadap gangguan dan lamanya waktu pemutusan gangguan seperti pada Gambar lampiran 3. Untuk kondisi pemutusan 500 milidetik semua generator pada unit-unit pembangkitan Bengkulu kehilangan kestabilan terhadap sudut rotor.

#### 4.2.2 Kestabilan Sistem Tenaga dengan Tambahan DG *Photovoltaic*

Dari simulasi dengan tambahan dua unit DG *photovoltaic* dapat dilihat generator dalam kondisi normal dan sudut rotor dalam kondisi yang stabil. Selanjutnya dari simulasi yang telah dilakukan dengan rangkaian sistem pembangkitan wilayah Bengkulu yang sama dengan penambahan dua unit DG *photovoltaic* pada bus beban trafo unit satu dan trafo unit dua dengan kapasitas

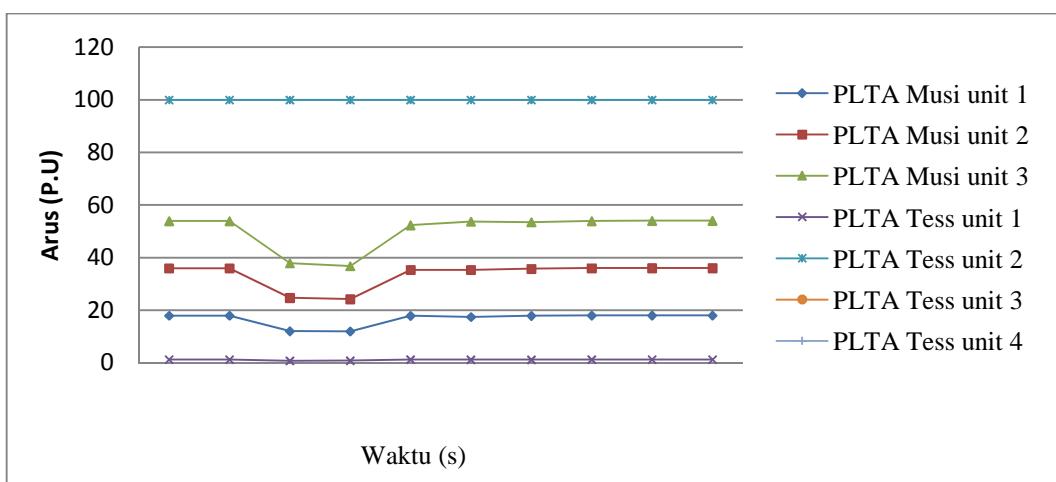
1,2 MW dan selanjutnya diberi gangguan tiga fasa pada bus beban trafo 3 sukamerindu dengan variasi Pemutusan gangguan yakni 100 milidetik, 250 milidetik dan 500 milidetik seperti pada kondisi simulasi awal dimana sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu tanpa menggunakan tambahan DG, untuk pemutusan 100 milidetik yang pertama seperti Gambar 4.16 berikut grafik hasil simulasi pada Gambar lampiran 4.

Dari simulasi pada rangkaian Gambar 4.16 diperoleh grafik respon kestabilan sudut rotor generator setelah diberi gangguan tiga fasa pada bus beban trafo unit tiga sukamerindu dengan waktu pemutusan di atur pada waktu 100 milidetik seperti pada Gambar 4.17 dan diperoleh data hasil simulasi terhadap perubahan arus saat sebelum dan sesudah terjadinya gangguan, perubahan daya keluaran generator dan daya reaktif pada generator – generator yang sedang beroprasi.

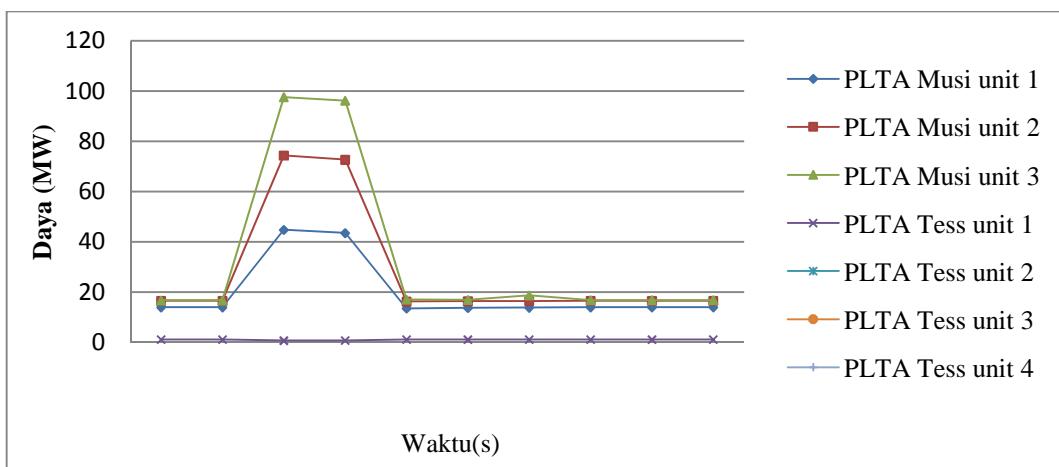


Gambar 4.16 Simulasi sistem dengan tambahan DG *photovoltaic* pada gangguan tiga fasa

Data pada Tabel 4.4 menunjukkan adanya perubahan terhadap arus, daya aktif dan daya reaktif saat gangguan terjadi hingga diputusnya gangguan tersebut, dari Tabel 4.4 di peroleh grafik sebagai berikut.

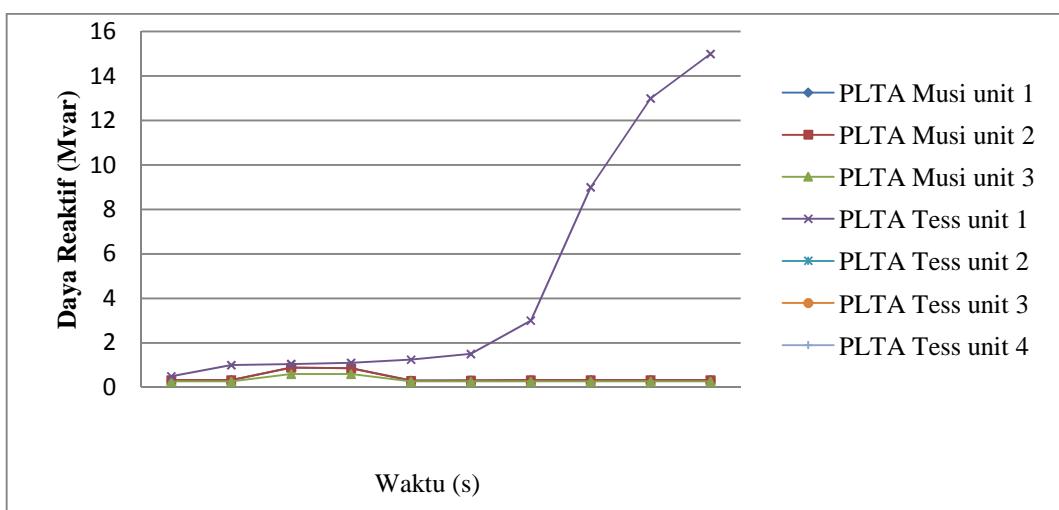


Gambar 4.17 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV padawaktu pemutusan gangguan 100 milidetik



Gambar 4.18 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Pada Gambar 4.17 sesaat setelah terjadinya gangguan atau detik pertama terjadinya gangguan, semua unit – unit generator yang bekerja saat terjadinya gangguan mengalami kenaikan arus 0,88 P.U pada unit PLTA Musi dan 0,6 pu pada unit pembangkit PLTA Tess. Kondisi pembangkit kembali ke kondisi awal seperti sebelum terjadinya gangguan pada detik ke 1,25 dimana gangguan diputus pada detik ke 1,1. Sedangkan pada daya yang dihasilkan pada generator terjadi penurunan Gambar 4.18 dimana penurunan terbesar pada unit generator tiga PLTA Musi yang beroprasi 53,9 MW turun menjadi 36,8 MW, begitu juga pada generator lainnya terjadi penurunan 6-17 MW untuk pembangkit PLTA Musi dan 0,4 MW untuk generator unit PLTA Tess.



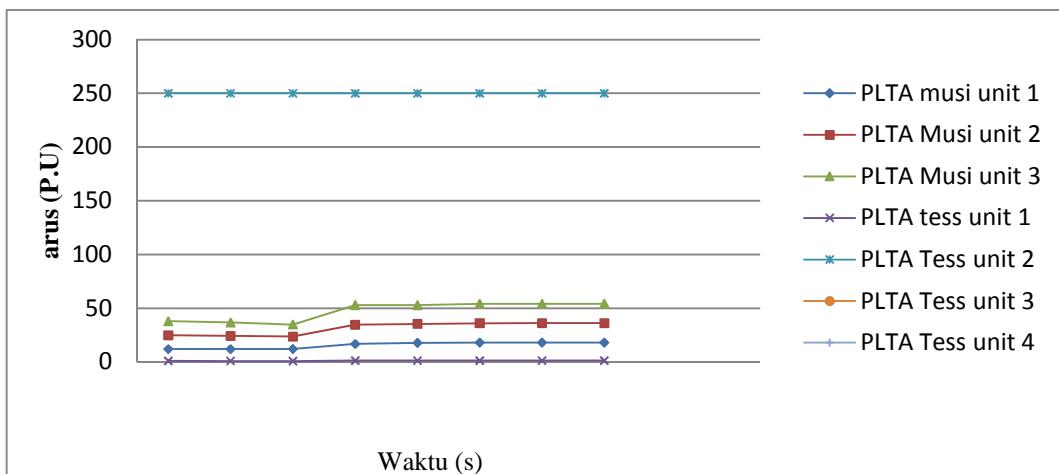
Gambar 4.19 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Pada daya reaktif saat gangguan terjadi mengalami kenaikan yang tinggi 97 Mvar pada unit PLTA Musi dan pada unit pembangkit PLTA Tess kenaikan daya reaktif juga tinggi 4,5 Mvar selama 100 milidetik seperti pada Gambar 4.22 grafik perubahan daya reaktif sebelum dan sesudah terjadinya gangguan. Selanjutnya respon sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa dengan waktu pemutusan 100 milidetik Gambar lampiran 4.

Berdasarkan grafik hasil simulasi Gambar 4.19 generator - generator yang beroprasi pada saat terjadi gangguan dengan pemutusan gangguan 100 milidetik mampu menjaga kondisi tetap dalam kondisi sinkron dan stabil, hal ini terlihat dari grafik kestabilan sudut rotor terhadap gangguan tiga fasa yang diberikan. Dengan pengontrolan automatis yang efektif terutama pada regulasi automatis (AVR) yang bekerja pada generator untuk menjaga kondisi generator saat gangguan terjadi. Waktu yang diperlukan generator untuk benar – benar kembali ke kondisi awal berkisar empat sampai lima detik dimulai dari detik pertama hingga berakhirnya gangguan.

Kemudian pemutusan gangguan di set pada 250 milidetik dengan rangkaian simulasi yang sama seperti pada pemutusan 100 milidetik dan hasil simulasi respon sudut rotor generator terhadap lamanya gangguan yang terjadi pada Gambar lampiran 5 dan data hasil simulasi sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan tambahan DG pada Tabel 4.5.

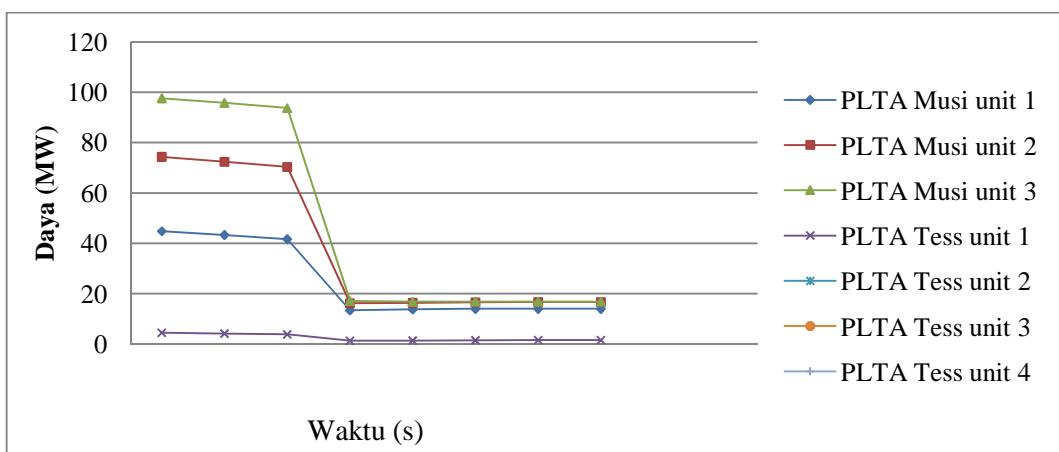
Berdasarkan Tabel 4.5 diperoleh grafik perubahan arus, daya keluaran generator dan daya reaktif generator saat terjadinya gangguan tiga fasa.



Gambar 4.20 Grafik Perubahan perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

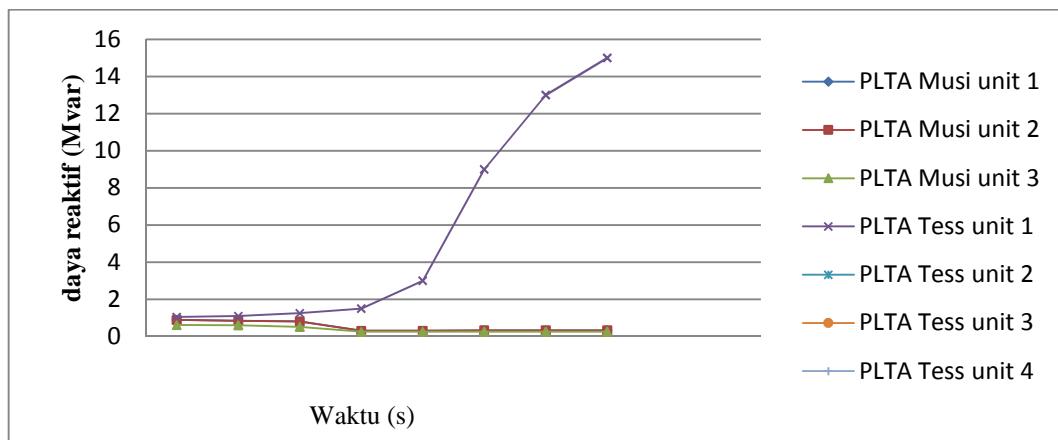
Berdasarkan Gambar 4.20 dapat dilihat grafik kenaikan arus gangguan yang cukup tinggi pada unit – unit generator pembangkit dengan kenaikan arus gangguan

mencapai 0,85 P.U pada unit pembangkit PLTA Musi dan PLTA Tess hingga gangguan tersebut diputus pada detik ke 1,25 dan sistem kembali ke kondisi normal.



Gambar 4.21 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Selanjutnya pada Gambar 4.21 perubahan daya keluaran generator menunjukkan penurunan daya selama gangguan terjadi 250 milidetik, dimana pada generator unit satu PLTA Musi daya keluaran turun menjadi 11MW dan unit generator dua turun menjadi 23 MW serta generator unit tiga turun menjadi 34,81 MW. Untuk generator PLTA Tess penurunan berkisar 0,4 MW untuk setiap unit pembangkitnya.



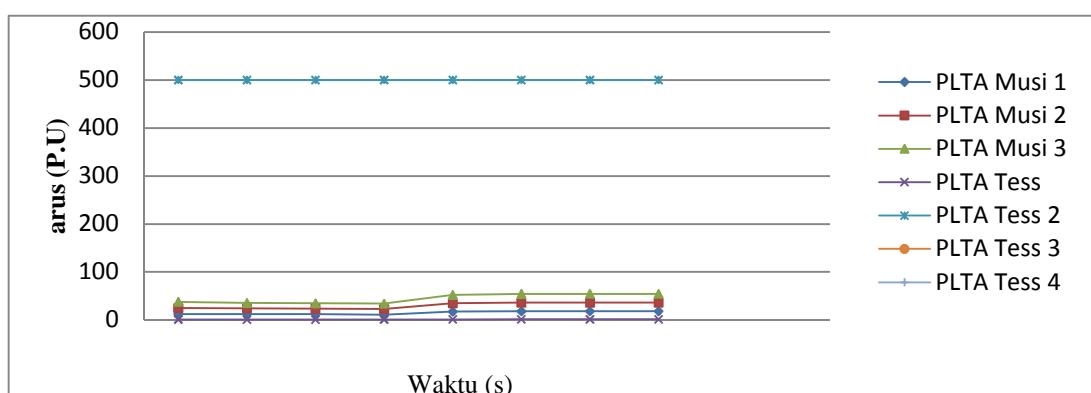
Gambar 4.22 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Gambar 4.22 menunjukkan perubahan daya reaktif yang tinggi saat gangguan terjadi, kenaikan daya reaktif pada unit satu PLTA Musi 44,84 Mvar dan unit dua PLTA Musi 74,37 Mvar serta unit tiga dengan kenaikan daya reaktif 97,6 Mvar. Untuk unit generator PLTA tess kenaikan daya reaktif mencapai 4,5 Mvar selama terjadinya gangguan.

Berdasarkan simulasi dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik diperoleh respon sudut generator utama dan tegangan keluaran PV seperti pada Gambar lampiran 5. Waktu pemutusan gangguan 250 milidetik pada generator berkapasitas besar seperti Unit PLTA Musi 3 x 70 MW yang memiliki sistem proteksi dan pengontrolan automatis dapat menjaga kestabilan sistem tersebut terhadap gangguan tiga fasa yang terjadi seperti pada respon sudut generator terhadap waktu pemutusan 250 milidetik Gambar lampiran 5. Namun pada unit pembangkit PLTA Tess, kestabilan sudut rotor ketika sesaat setelah gangguan terjadi sudah menunjukkan ketidak stabilan terlihat dari ayunan sudut generator

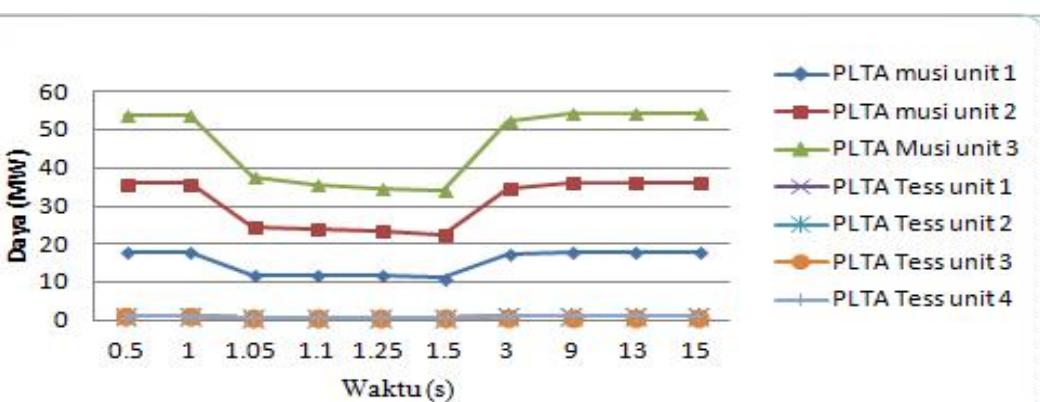
semua unit PLTA Tess Gambar lampiran 5 d, e, f, g, h, i. Daya keluaran dan arus generator pada semua unit mengalami gangguan selama 300 milidetik seperti pada Gambar 4.24 untuk Daya dan Gambar 4.23 untuk arus saat gangguan terjadi serta daya reaktif yang tinggi saat terjadinya gangguan dan tentunya dapat membahayakan generator.

Waktu pemutusan gangguan selanjutnya diatur pada 500 milidetik untuk melihat respon sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa dengan grafik hasil simulasi pada Gambar lampiran 6 dan data hasil simulasi pada Tabel 4.6.



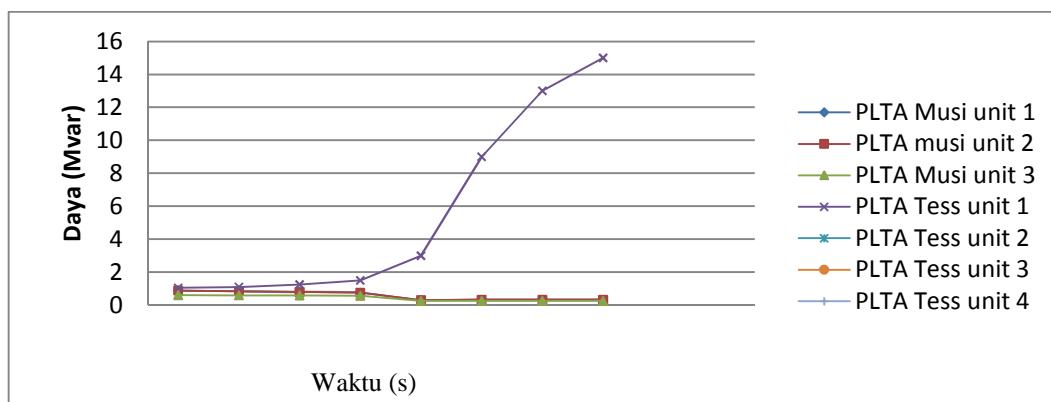
Gambar 4.23 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Berdasarkan Gambar 4.23 grafik perubahan arus menunjukkan kenaikan tertinggi pada saat setik pertama terjadinya gangguan dan berangsurn turun hingga gangguan diputus pada 500 milidetik sesaat setelah terjadinya gangguan dengan kenaikan mencapai 0.89 P.U untuk unit PLTA Musi dan unit empat PLTA Tess, untuk unit 1-3 PLTA tess kenaikan tertinggi 0,5 P.U.



Gambar 4.24 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Grafik perubahan daya pada Gambar 4.24 menunjukkan penurunan yang cukup besar terutama pada unit generator PLTA Musi dimana pada unit generator satu daya keluaran turun menjadi 11,9 MW, unit generator dua turun menjadi 22,6 MW dan generator unit tiga menjadi 34 MW, sedangkan pada unit generator PLTA Tess daya keluaran dari pembangkit 1-4 turun menjadi 0.8 MW.

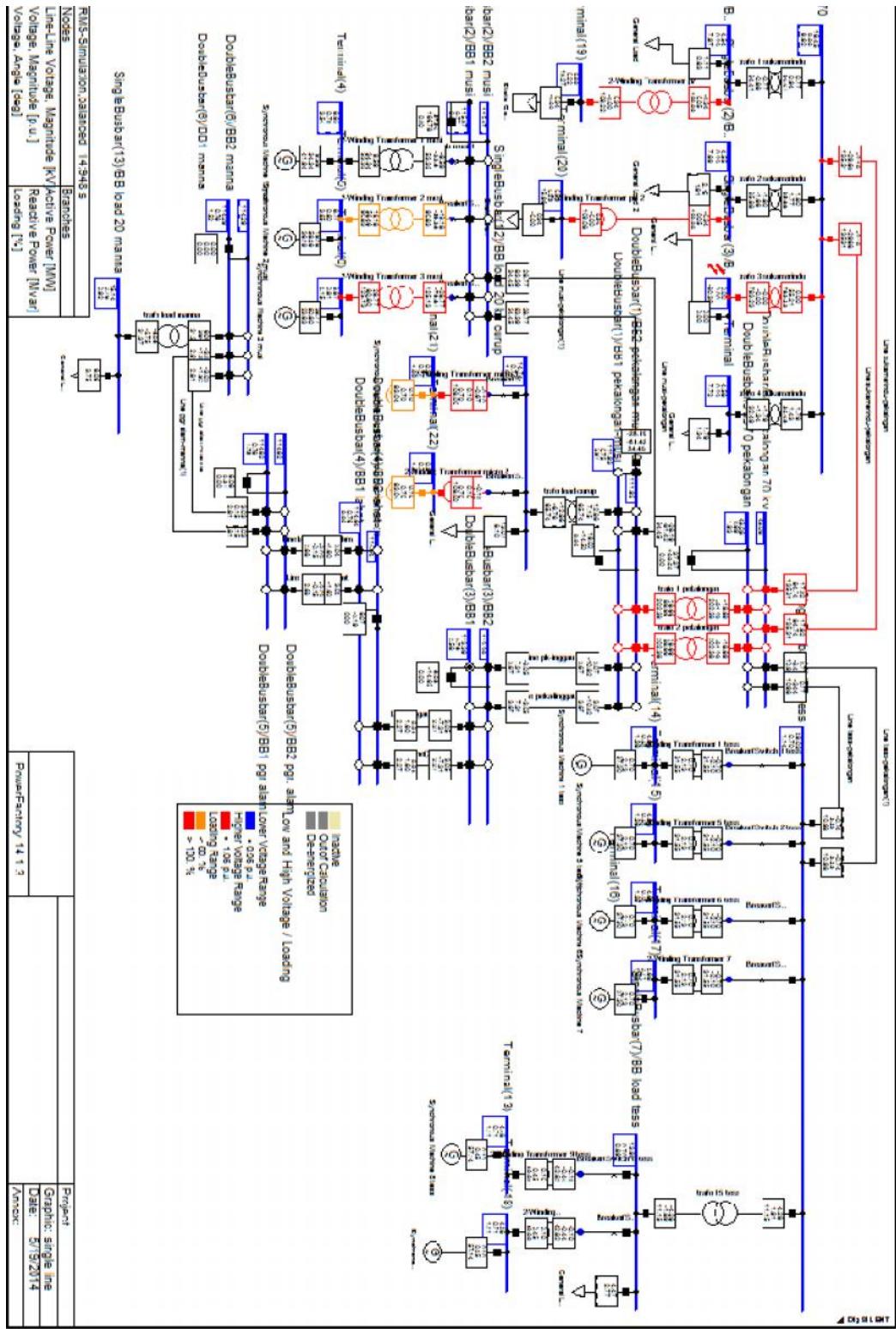


Gambar 4.25 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Untuk perubahan daya reaktif pada grafik Gambar 4.25 menunjukkan grafik peningkatan daya reaktif pada generator dan berlangsung cukup lama. Kenaikan daya reaktif pada unit generator satu PLTA Musi menjadi 44,84 Mvar dan generator unit dua 74,3 Mvar, generator unit tiga 97,6 Mvar. Untuk generator pada unit PLTA Tess kenaikan daya reaktif mencapai 4,5 Mvar. Dengan pemutusan 500 milidetik semua generator utama kehilangan kestabilan sudut rotor terlihat dari grafik hasil simulasi dimana kurva ayunan tidak berayun pada titik keseimbangan dan kecepatan putar generator tentunya terus mengalami peningkatan dan juga di ikuti perubahan daya pada Gambar 4.24 dan terjadi lonjakan perubahan arus pada Gambar 4.23 serta naiknya daya reaktif yang tinggi dan dapat membahayakan generator seperti naiknya temperatur generator sampai generator lepas dari kondisi sinkron, pada sumber *photovoltaic* terjadi drop tegangan terhadap kedua unit *photovoltaic*. Hal ini tentunya membahayakan sistem terutama generator utama jika pemutusan di seting pada 500 milidetik.

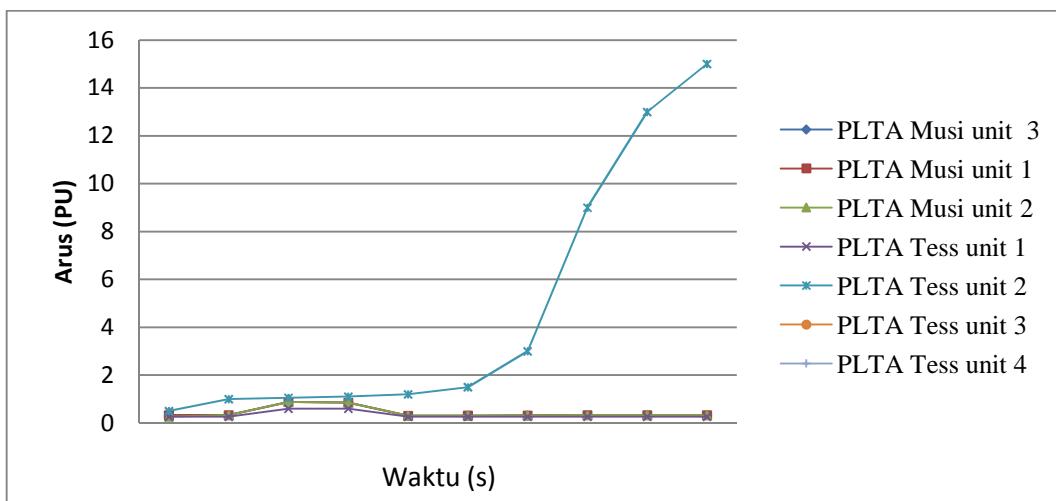
#### 4.2.3 Sistem Tenaga Dengan Tambahan DG *Photovoltaic* dan *microhydro*

Selanjutnya pada simulasi ini diberikan gangguan 3 fasa pada bus beban 20 kV sukamerindu seperti gambar 4.26 dengan penambahan dua unit DG *microhydro* berkapasitas  $2 \times 700$  kW yang terhubung dengan bus beban pekalongan pada kondisi normal memikul beban 22.83 MW, pada simulasi ini total penggunaan DG pada sistem sebanyak empat unit dan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik, 250 milidetik dan 500 milidetik. Simulasi yang pertama dengan waktu pemutusan 100 milidetik terhadap gangguan tiga fasa menghasilkan respon sudut rotor generator seperti pada Gambar lampiran 7 dan data hasil simulasi pada Tabel 4.7.



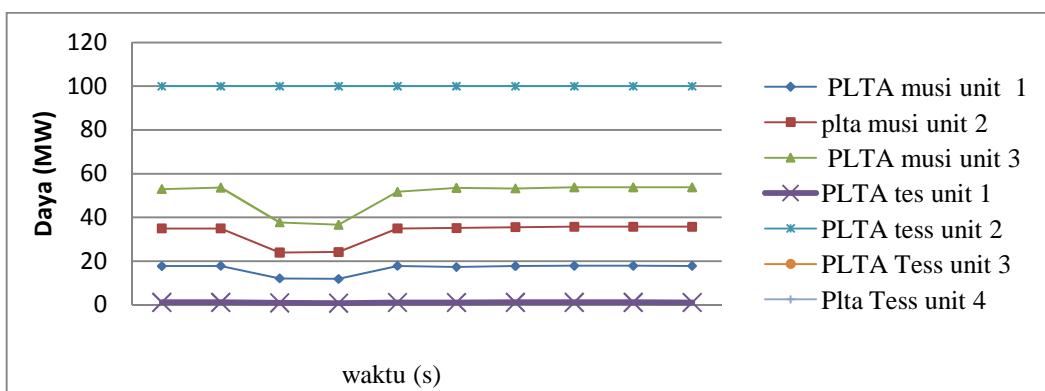
Gambar 4.26 Single line gangguan pada sistem dengan tambahan DG *photovoltaic* dan *microhydro*

Tabel 4.7 merupakan data hasil simulasi terhadap sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu terhadap penambahan empat unit DG dan diberikannya gangguan tiga fasa dengan waktu pemutusan 100 milidetik, pada Gambar 4.33 menunjukkan grafik perubahan arus saat gangguan terjadi.



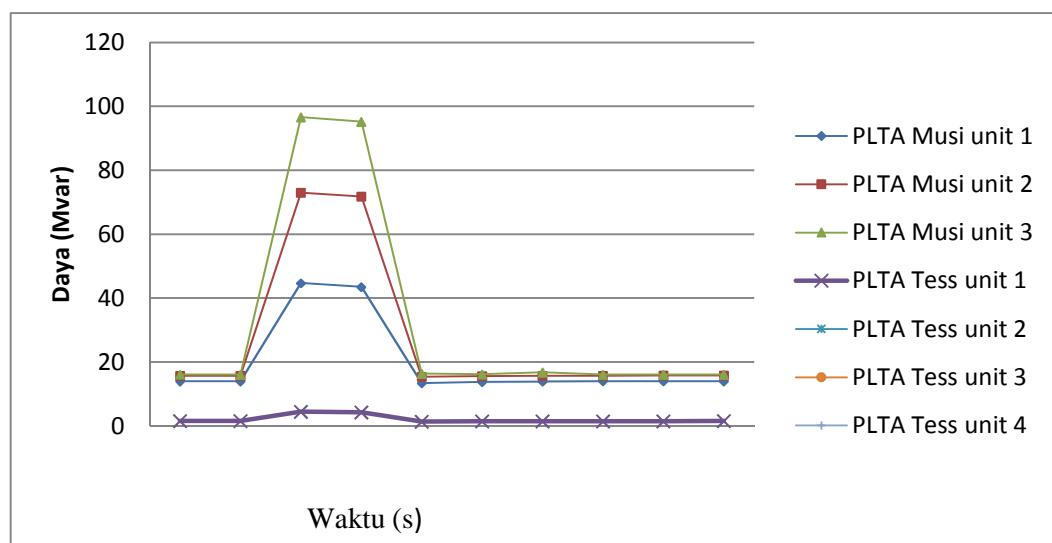
Gambar 4.27 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Dari Gambar 4.27 menunjukkan perubahan kenaikan arus saat terjadinya gangguan dan peurunan arus saat gangguan diputus pada 100 milidetik, pada terjadinya gangguan pada detik 1,05 semua unit generator PLTA Musi terjadi peningkatan arus sebesar 0,88 pu dan unit PLTA Tess unit generator satu 0,6 pu, unit generator dua 0,5 pu, unit generator tiga 0,44 pu serta unit generator empat 0,88 pu. Penurunan arus dimulai pada detik ke 1,1 dimana pada detik tersebut terjadi pemutusan terhadap gangguan dan arus kembali normal seperti sebelum terjadinya gangguan dimulai pada detik ke 1,2.



Gambar 4.28 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Grafik perubahan daya keluaran generator pada Gambar 4. 28 menunjukkan penurunan daya keluaran pada generator dengan besar penurunan daya pada unit generator tiga PLTA musi menjadi 37,8 MW, unit generstor dua 24 MW dan generator unit satu 11,95 MW. Sedangkan pada unit pembangkit 1-4 PLTA Tess terjadi penurunan daya keluaran menjadi 0,85 MW saat terjadinya gangguan dan kembali kekondisi semula setelah gangguan diputus pada detik 1,1.



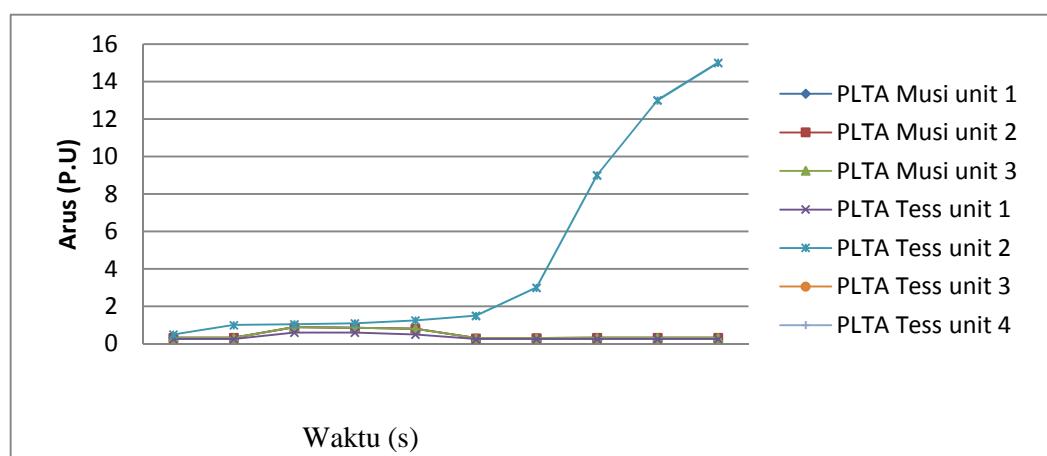
Gambar 4.29 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik

Pada Gambar 4.29 menunjukkan kenaikan daya reaktif yang besar sesaat setelah terjadinya gangguan, pada unit generator satu PLTA Musi saat terjadi gangguan daya reaktif mencapai 44,7 Mvar, generator unit dua 71,8 Mvar dan generator unit tiga 96,6 Mvar. Pada unit generator 1-4 PLTA Tess kenaikan daya reaktif 4,5 Mvar.

Simulasi dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan penambahan empat unit DG menghasilkan respon sudut rotor terhadap gangguan yang terjadi pada Gambar lampiran 7. Dari Gambar 4.36 dapat dilihat pengaruh gangguan tiga fasa yang diberikan pada detik ke-1 dengan waktu pemutusan 100 milidetik generator pada Unit PLTA Musi masih dalam kondisi stabil, serta generator 1-6 unit PLTA Tess

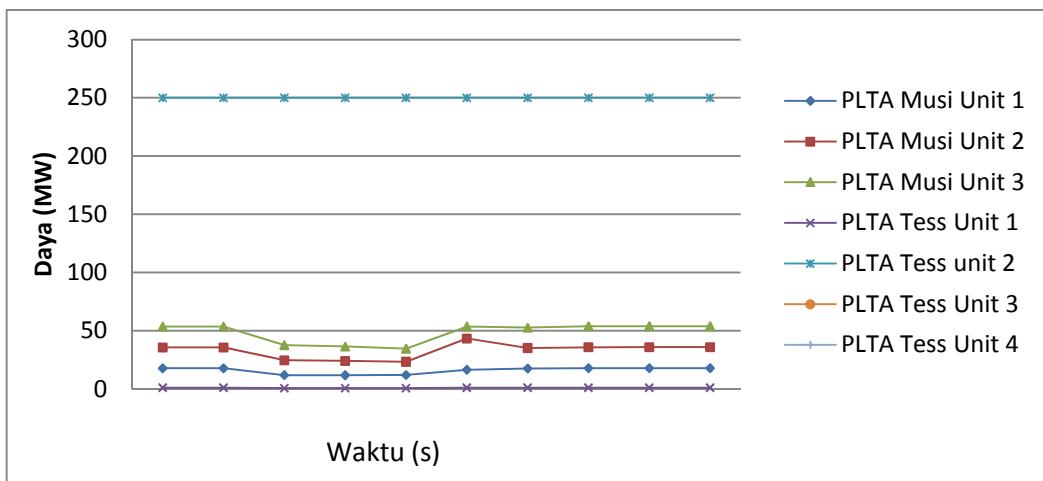
juga dalam kondisi yang stabil sedangkan pada generator DG *microhydro* dapat kembali kekondisi semula namun terdapat riak dalam beberapa detik lebih lama dibandingkan generator utama dan pada *photovoltaic* terjadi penurunan tegangan namun dapat segera kembali kekondisi semula, perubahan daya dan arus saat terjadi gangguan dapat dilihat pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.27 sedangkan untuk perubahan daya reaktif generator pada Gambar 4.29.

Kemudian pada Simulasi yang kedua dengan waktu pemutusan 250 milidetik menghasilkan respon sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa seperti pada Gambar lampiran 8 dan data hasil simulasi pada Tabel 4.8. .



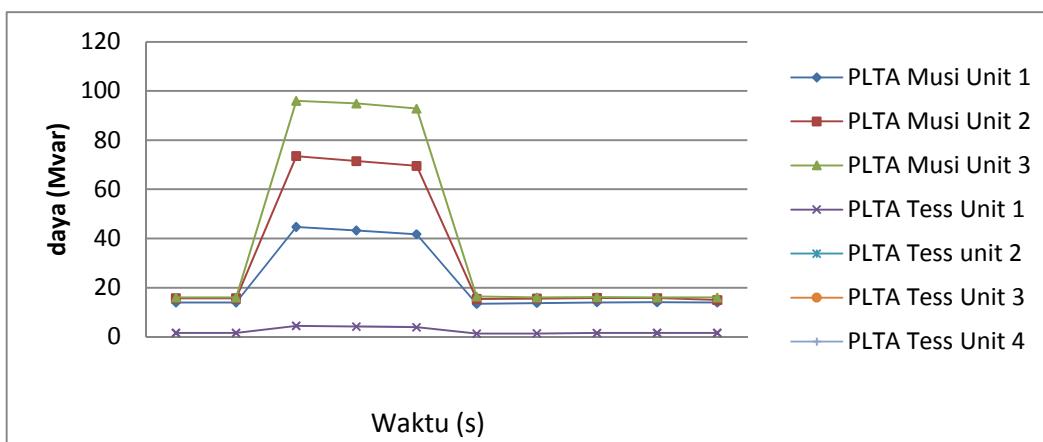
Gambar 4.30 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro pada waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Grafik pada Gambar 4.30 menunjukkan tingginya arus gangguan yang terjadi pada generator utama, pada generator unit satu PLTA Musi terjadi kenaikan arus gangguan sebesar 0,85 pu, unit generator dua 0,85 pu dan generator unit tiga 0,85. Sedangkan pada unit generator satu PLTA Tess 0,6 pu, unit generator dua 0,5 pu, generator unit tiga 0,44 pu dan generator unit empat 0,8 pu.



Gambar 4.31 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Pada grafik Gambar 4.31 penurunan daya keluaran generator sebagai akibat dari terjadinya gangguan tiga fasa, penurunan yang cukup besar pada unit-unit pembangkit PLTA Musi dimana pada unit satu daya keluaran generator turun menjadi 11,95 MW, unit generator dua 23,5 MW dan unit generator tiga 34,7 MW. Sedangkan pada unit pembangkit 1-4 PLTA Tess semua generator mengalami penurunan daya menjadi 0,81 MW, daya keluaran generator mulai kembali normal pada detik 1,5 dimana pada detik 1,25 terjadi pemutusan gangguan.

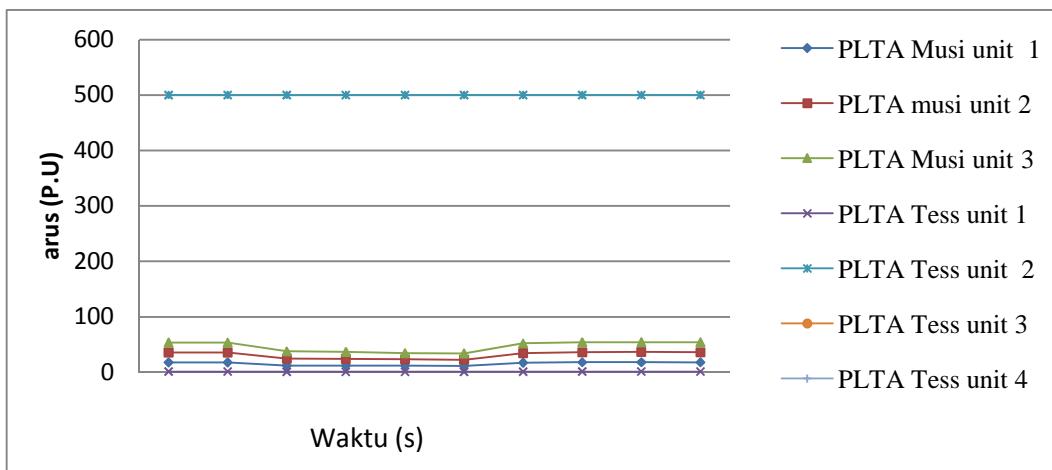


Gambar 4.32 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 250 milidetik

Pada gambar 4.32 menunjukkan kenaikan daya reaktif yang besar saat terjadinya gangguan, dimana kenaikan yang tinggi pada unit generator PLTA Musi. Pada unit satu PLTA Musi daya reaktif pada generator 44,7 Mvar, unit generator dua 73,5 Mvar dan unit tiga 94,9 Mvar dan untuk generator unit 1-4 PLTA tess kenaikan daya reaktif 4,5 Mvar. Selanjutnya pada Gambar lampiran 8 menunjukkan respon kestabilan sudut rotor generator terhadap waktu pemutusan gangguan 250 milidetik.

Dari grafik simulasi pemutusan gangguan 250 milidetik pada Gambar lampiran 8, dapat dilihat dengan penambahan DG *microhydro* 2 x 700 kW kemampuan Unit PLTA Tess lebih baik dibandingkan tanpa tambahan DG seperti pada simulasi yang telah dilakukan sebelumnya lengkung ayunan lebih stabil. Dengan waktu pemutusan lebih lama 250 milidetik untuk unit PLTA Musi masih dalam kondisi stabil walaupun terdapat penurunan daya berkisar 5-10 MW pada unit PLTA Musi dan terjadi lonjakan arus dalam waktu relatif singkat 300 milidetik seperti Gambar 4.30 dan Gambar 4.31, sedangkan pada daya reaktif terjadi kenaikan pada detik pertama dan berangsur turun setelah dilakukan pemutusan pada detik 1,25 dan untuk *microhydro* terjadi osilasi pada grafik hasil simulasi sebagai akibat dari pengaruh gangguan yang terjadi, sedangkan pada *photovoltaic* terjadi drop tegangan sesaat saat gangguan terjadi namun dapat kembali kekondisi yang stabil daya keluaran yang dihasilkan oleh *photovoltaic*.

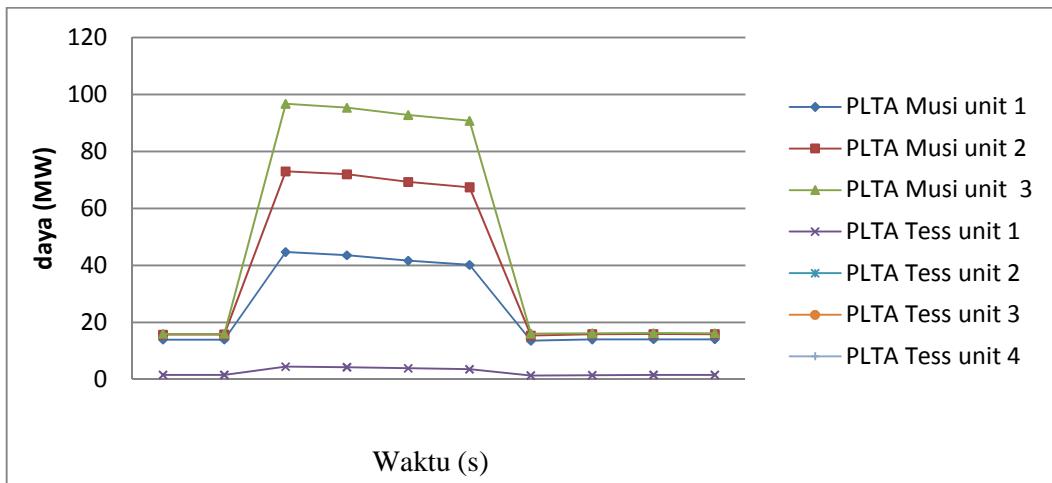
Simulasi yang ketiga dengan waktu pemutusan 500 milidetik menghasilkan respon sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa seperti pada Gambar 4.44, grafik pengaruh lamanya waktu gangguan terhadap arus, daya, dan daya reaktif. Data hasil simulasi terhadap waktu pemutusan gangguan 500 milidetik pada Tabel 4.9. Berdasarkan data hasil simulasi terhadap sistem tenaga listrik wilayah bengkulu terhadap penambahan empat unit DG dan dengan waktu pemutusan gangguan lebih lama yakni 500 milidetik, dapat dilihat grafik perubahan arus Gambar 4.41, daya keluaran generator Gambar 4.42 dan perubahan daya reaktif generator Gambar 4.43.



Gambar 4.33 Grafik Perubahan arus pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Pada Gambar 4.33 menunjukkan peningkatan arus gangguan sebesar 0,89 pu pada unit pembangkit PLTA Musi, dan pada unit pembangkit PLTA Tess terjadi

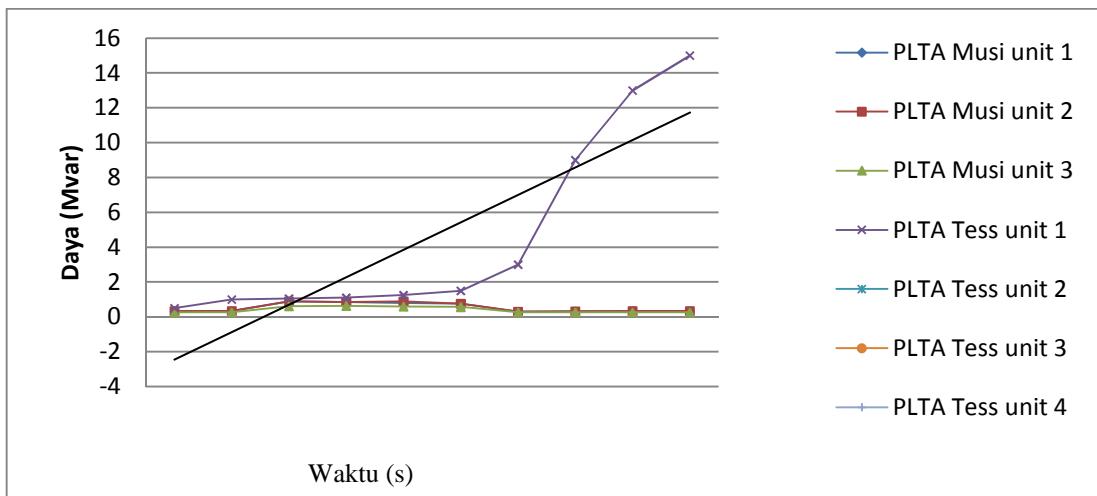
peningkatan arus gangguan pada unit generator satu sebesar 0,6 P.U, generator unit dua 0,5 pu generator unit tiga 0,5 pu dan unit generator empat 0,85 pu.



Gambar 4.34 Grafik Perubahan daya pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Dengan terjadinya gangguan berdampak pada daya keluaran generator yang cukup besar pada unit pembangkit PLTA Musi, pada generator unit satu daya keluaran generator turun 11,94 MW, generator unit dua turun menjadi 22,6 MW dan generator unit tiga turun 34,02 MW. Sedangkan untuk generator unit

PLTA Tess daya keluaran generator turun seiring dengan terjadinya gangguan 0,81 MW, daya keluaran generator mulai kembali kekondisi semula pada detik 1,5 atau sesaat setelah gangguan diputuskan.



Gambar 4.35 Grafik Perubahan daya reaktif pada Pembangkit utama dengan tambahan DG PV dan microhydro dengan waktu pemutusan gangguan 500 milidetik

Untuk perubahan daya reaktif pada Gambar 4.35 terjadi kenaikan daya reaktif yang tinggi terutama pada unit pembangkit dengan kapasitas besar seperti PLTA Musi dengan kenaikan daya reaktif pad unit tiga sebesar 96,7 Mvar, unit dua sebesar 73 Mvar dan unit satu sebesar 44,7 Mvar. Sedangkan pada generator PLTA Tess kenaikan daya reaktif sebesar 4,5 Mvar.

Pada Gambar lampiran 9 menunjukkan respon kestabilan sudut rotor terhadap gangguan tiga fasa pada pemutusan gangguan 500 milidetik, Ketika pemutusan 500 milidetik semua unit generator menunjukkan respon ketidak stabilan sudut rotor generator terhadap gangguan tiga fasa Gambar lampiran 9 dengan waktu pemutusan yang lama 500 milidetik semua generator yang beroprasi tidak mampu menjaga kestabilan sudut rotor. Dan pada grafik perubahan arus terhadap lamanya gangguan menunjukkan kenaikan arus akibat gangguan 0.89 pu titik tertinggi sedangkan untuk daya keluaran pada generator terjadi penurunan daya keluaran hingga 20 MW pada unit tiga PLTA Musi, dan daya reaktif menunjukkan peningkatan hingga 96 Mvar. Dengan kondisi seperti ini jika berlangsung dalam waktu yang lama dapat menyebabkan sistem mati total (*black out*) hal ini dikarenakan saat waktu pemutusan yang lama tentunya akan

menunda pengontrolan sistem proteksi seperti pengontrolan governor untuk menaikan atau menurunkan daya input sehingga akan terus menambah ayunan berikutnya bukan malah menurunkan ayunan gangguan yang terjadi. Sehingga diperlukannya sistem pengontrolan yang efektif terhadap sistem yang bekerja.

#### **4.3 Waktu Pemutusan Gangguan**

Pada Tabel 4.10 menunjukkan respon generator terhadap variasi waktu pemutusan gangguan yaitu 100 milidetik, 250 milidetik dan 500 milidetik pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu. Pada simulasi yang dibagi dalam tiga kondisi sistem yaitu sistem tanpa tambahan DG, sistem dengan tambahan DG tingkat 1, dan sistem dengan tambahan DG tingkat 2. Sistem tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan gangguan 100, 250 dan 500 milidetik masih dapat mempertahankan kestabilann pada waktu pemutusan 100 dan 250 milidetik sedangkan untuk 500 milidetik sistem tdak berada dalam kondisi stabil, kondisi arus gangguan tertinggi pada waktu pemutusan gangguan 100 milidetik dengan arus gangguan 0.88 pu pada unit 3 PLTA Musi dan 0,85 pu pada unit 4 PLTA Tess, pada waktu pemutusan gangguan 250 dan 500 milidetik kondisi arus cenderung sedikit turun 0.76 pu namun dengan lamanya waktu pemutusan gangguan tentunya dapat membahayakan sistem, dan untuk daya keluaran generator semakin lama waktu pemutusan gangguan maka daya keluaran generator akan terus mengalami penurunan daya keluaran dan tinginya daya reaktif akibat gangguan 96,32 Mvar pada unit tiga yang dapat membahayakan kondisi generator.

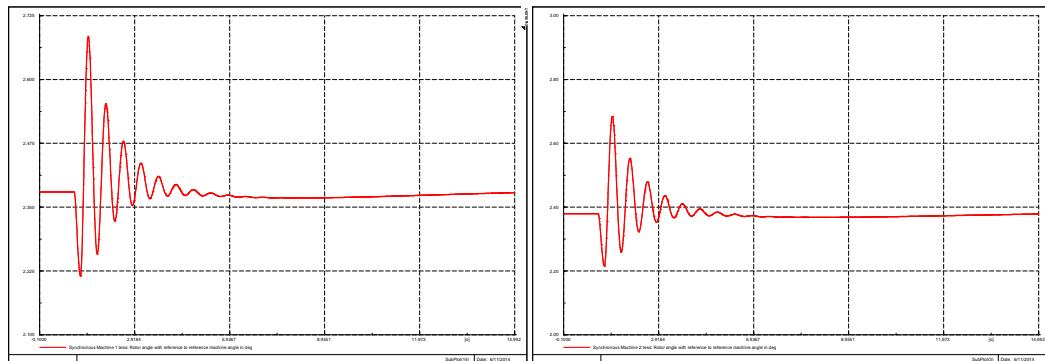
Selanjutnya pada penambahan DG tingkat 1 beban kerja unit pembangkit generator sedikit berkurang dengan adanya suplai dari pembangkit *photovoltaic* namun arus gangguan yang terjadi tidak jauh berbeda dengan kondisi tanpa tambahan DG 0.88 pu pada ketiga unit pembangkit PLTA Musi dengan waktu pemutusan 100 milidetik, untuk daya keluaran generator lebih rendah dari sistem tambahan DG hal ini dikarenakan suplai tambahan dari unit pembangkit DG dan terus menurun hingga kondisi pemutusan 500 milidetik dan untuk daya reaktif tertinggi 96 Mvar pada unit tiga PLTA Musi.

Kemudian dengan penambahan DG tingkat 2 kondisi unit – unit pembangkit juga tidak jauh berbeda seperti tanpa tambahan DG namun pada

respon sudut rotor generator terhadap gangguan lebih baik dibandingkan pada sistem tanpa tambahan DG seperti pada gambar lampiran 9 lengkung ayunan kurva lebih stabil dibandingkan tanpa DG. Untuk arus gangguan pada unit PLTA Musi 0.88 pu dengan waktu pemutusan 100 milidetik dan unit generator PLTA Tess 0.81 pada waktu pemutusan 250 milidetik, untuk daya aktif generator sama seperti sebelumnya semakin lama waktu pemutusan gangguan maka semakin besar penurunan daya keluaran seperti pada Tabel 4.10 dan daya reaktif keluaran generator 95,2 Mvar pada pemutusan 100 milidetik.

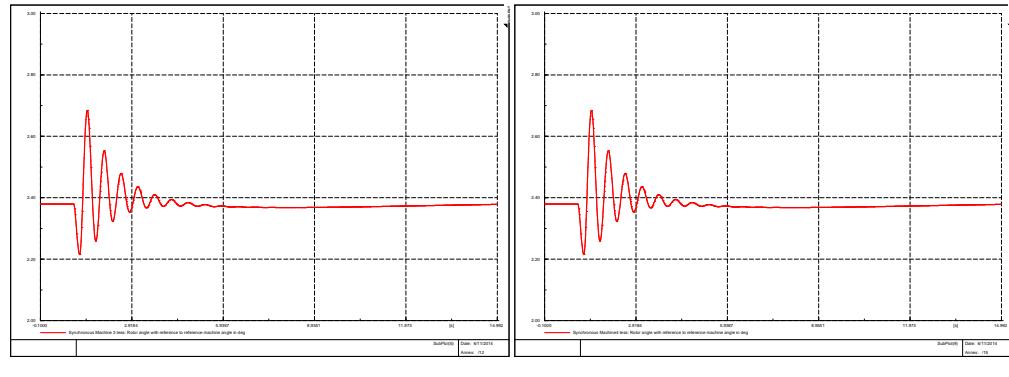
#### 4.3.1 Critical Clearing Time Pembangkit Tanpa Tambahan DG

Pada sistem pembangkitan wilayah kerja PT.PLN Sektor Bengkulu dengan Sembilan unit pembangkit utama yang diujikan menggunakan program simulasi Digsilent. Untuk waktu pemutusan gangguan atau *critical clearing time* pada sistem pembangkitan tanpa tambahan DG yaitu 200 milidetik untuk pembangkit PLTA Tess unit 1 hingga unit 4 pada Gambar 4.36 sedangkan untuk unit 5 dan unit 6 pada 150 milidetik seperti pada gambar 4.37 dan untuk pembangkit Unit PLTA Musi yakni 250 tidak jauh berbeda dari hasil analisa perhitungan 0,231 detik seperti pada Gambar lampiran 2. Adanya perbedaan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* tergantung pada besar kapasitas dan kemampuan dari masing – masing generator dalam menjaga kestabilan terhadap gangguan yang terjadi, jika waktu pemutusan melebihi waktu pemutusan kritis maka generator akan kehilangan kestabilan seperti pada Gambar lampiran 3.



(a)

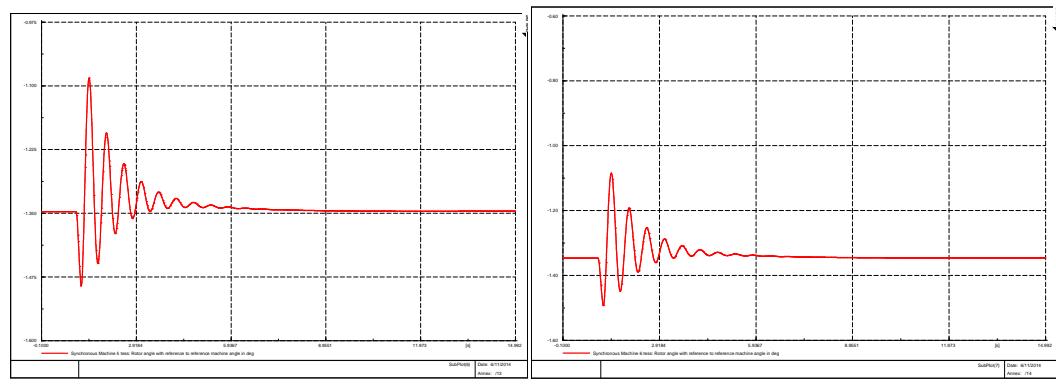
(b)



(c)

(d)

Gambar 4.36 Waktu pemutusan kritis 200 milidetik (a) unit 1 PLTA Tess, (b) Unit 2 PLTA Tess, (c) Unit 3 PLTA Tess, (d) Unit 4 PLTA Tess



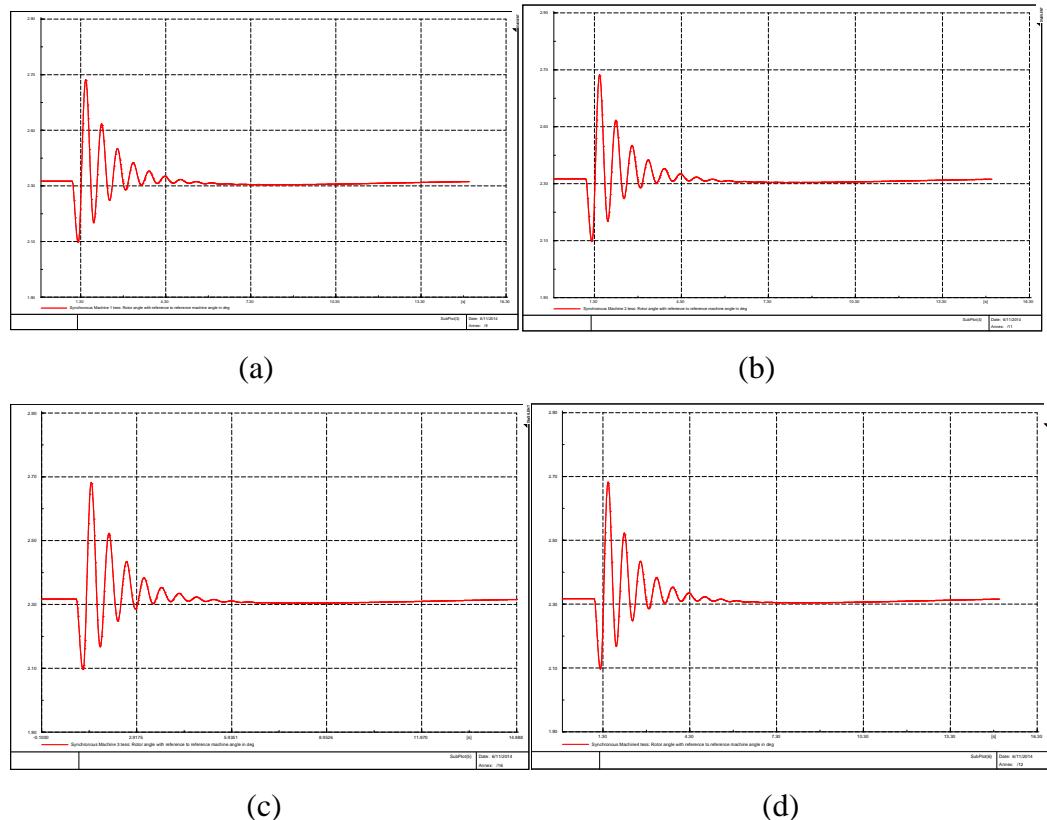
(a)

(b)

Gambar 4.37 Waktu Pemutusan Kritis 150 milidetik (a) Unit 5 Tess, (b) Unit 6 Tess

#### 4.3.2 Critical Clearing Time Pembangkit Dengan Tambahan DG Photovoltaic

Dengan tambahan dua unit DG *photovoltaic* waktu pemutusan kritis pada Unit PLTA Tess lebih baik dibandingkan tanpa tambahan DG, untuk Unit 1 - 4 PLTA Tess waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* yakni 230 milidetik seperti terlihat pada Gambar 4.38 sedangkan pada unit PLTA Tess dengan kapasitas 630 kW memiliki waktu pemutusan kritis 150 milidetik sama dengan kondisi tanpa DG pada Gambar 4.39 dan untuk Unit PLTA Musi waktu pemutusan kritis 250 milidetik, jika waktu pemutusan di seting melebihi waktu tersebut maka generator kehilangan kestabilannya.



Gambar 4.38 Waktu pemutusan 230 milidetik (a) generator unit 1 PLTA Tess (b) generator unit 2 PLTA Tess (c) generator unit 3 PLTA Tess (d) generator unit 4 PLTA Tess

#### 4.3.3 Critical Clearing Time Pembangkit dengan tambahan DG Photovoltaic dan Microhydro

Penambahan empat unit DG pada sistem pembangkitan Bengkulu dapat membantu kestabilan generator utama terhadap gangguan yang terjadi dan membantu trafo utama pada sistem distribusi dalam memikul beban dasar dan beban puncak. Untuk waktu pemutusan kritis pada generator utama terhadap penambahan empat DG sama seperti pada penambahan dua unit DG *photovoltaic*, untuk generator unit PLTA Musi waktu *critical clearing time* pada 250 milidetik dan untuk PLTA Tes unit 1-4 pada 230 milidetik, sedangkan pada unit 5 dan 6 berada pada 150 milidetik. Grafik ayunan pada generator utama lebih stabil dibandingkan pada saat sebelum penambahan unit DG.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

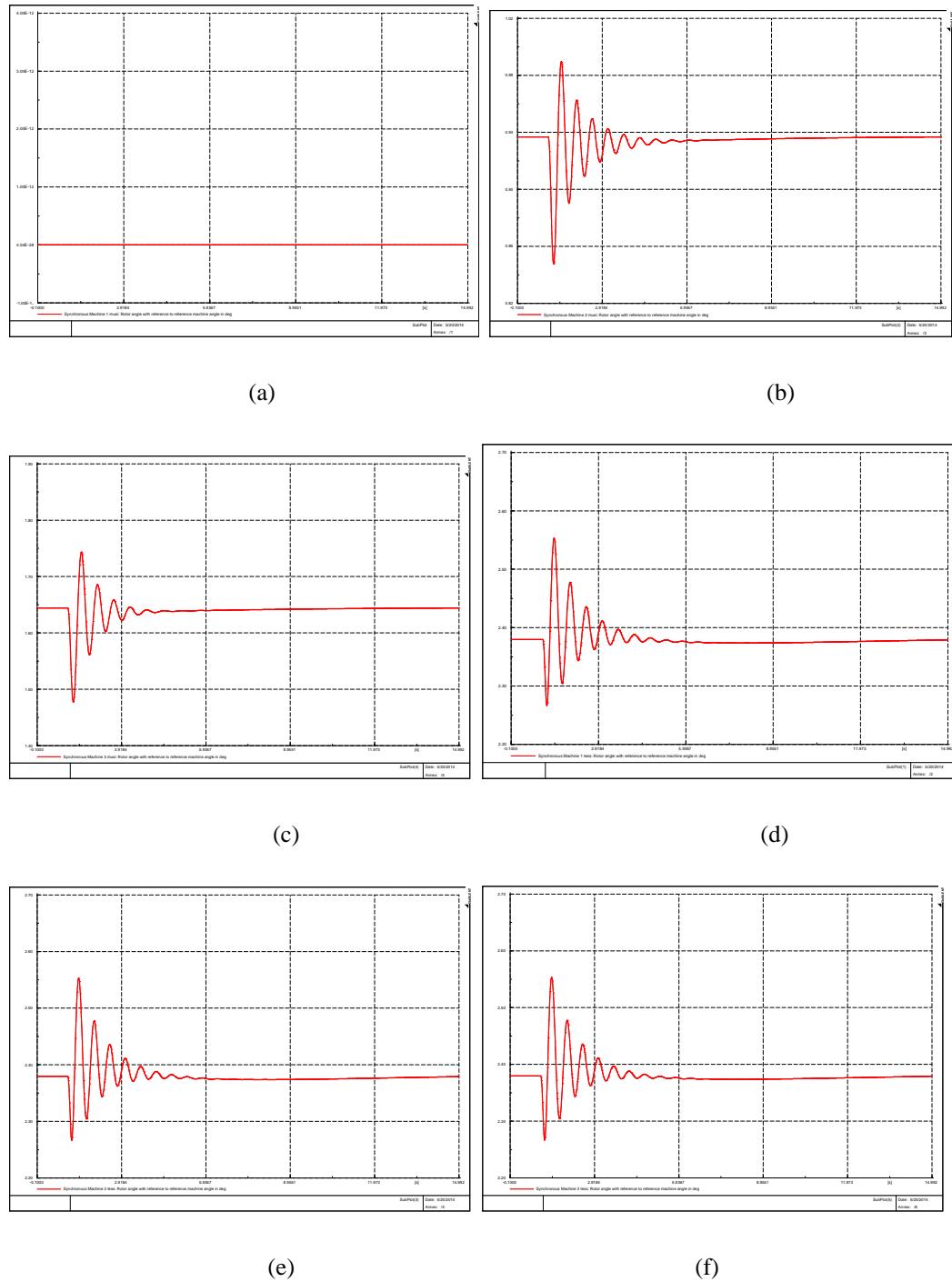
#### **5.1 Kesimpulan**

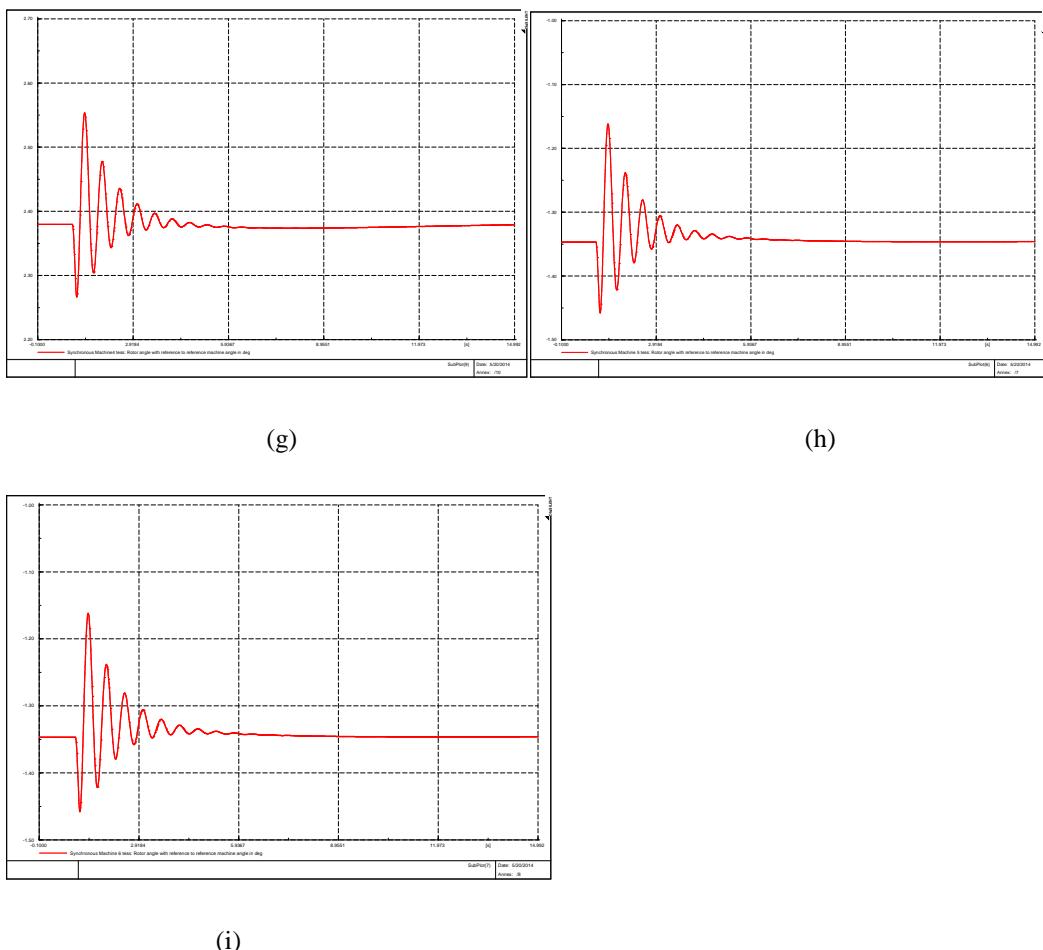
1. Pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu, generator – generator utama pada sistem pembangkitan memiliki grafik respon sudut rotor generator yang stabil sebelum penambahan DG dan setelah penambahan DG grafik respon sudut rotor generator tetap dalam kondisi yang stabil dan dengan penambahan DG beban kerja dari generator utama sedikit teralihkan dengan injeksi daya dari unit-unit pembangkit DG.
2. Setelah diberi gangguan transien, kondisi generator sebelum dan setelah penambahan DG tidak jauh berbeda dengan arus gangguan berkisar 0.8 PU, daya reaktif 96 Mvar, namun pada grafik simulasi kestabilan sudut rotor menunjukkan kondisi yang lebih stabil dengan penambahan DG .
3. Waktu pemutusan kritis pada unit pembangkit PLTA Musi pada waktu 250 milidetik, untuk generator unit 1-4 PLTA Tess pada detik 230 milidetik dan untuk unit 5 dan 6 pada waktu pemutusan kritis 150 milidetik. Jika waktu pemutusan melebihi waktu tersebut maka generator utama kehilangan kestabilan.

#### **5.2 Saran**

Sebaiknya penelitian selanjutnya menggunakan program simulasi Digsilent pada sistem keandalan pembangkit, hal ini dikarenakan pada bahasan ini tidak mengulas sistem keandalan dari pembangkit – pembangkit utama.

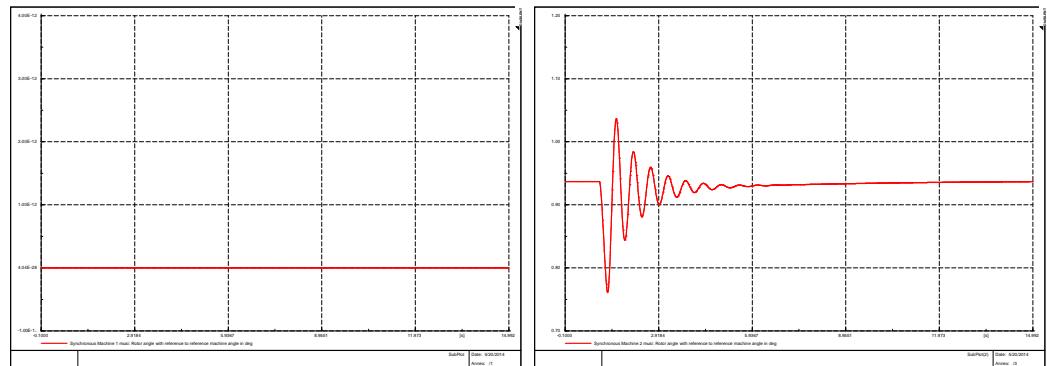
## Lampiran 1





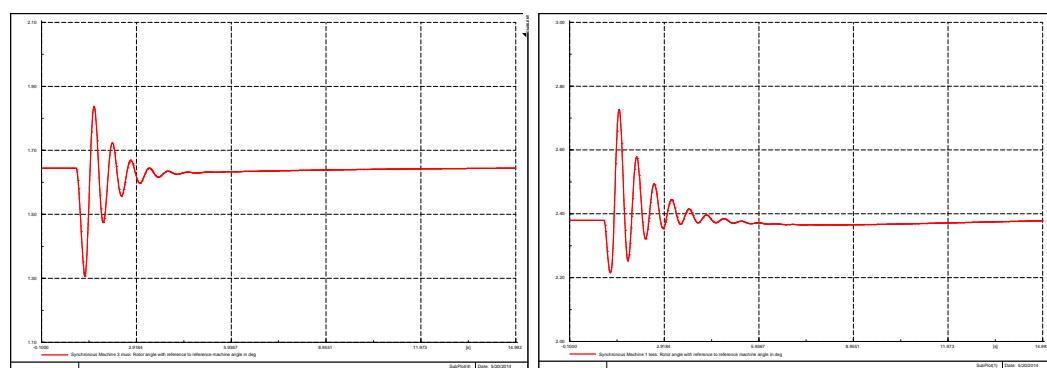
Gambar 1 grafik hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor tanpa tambahan DG dengan waktu pemutuskan 100 milidetik (a) generator 1 PLTA Musi, (b) generator 2 PLTA Musi, (c) generator 3 PLTA Musi, (d) generator 1 PLTA Tess, (e) generator 2 PLTA Tess, (f) generator 3 PLTA Tess, (g) generator 4 PLTA Tess, (h) generator 5 PLTA Tess, (i) generator 6 PLTA Tess.

## Lampiran 2



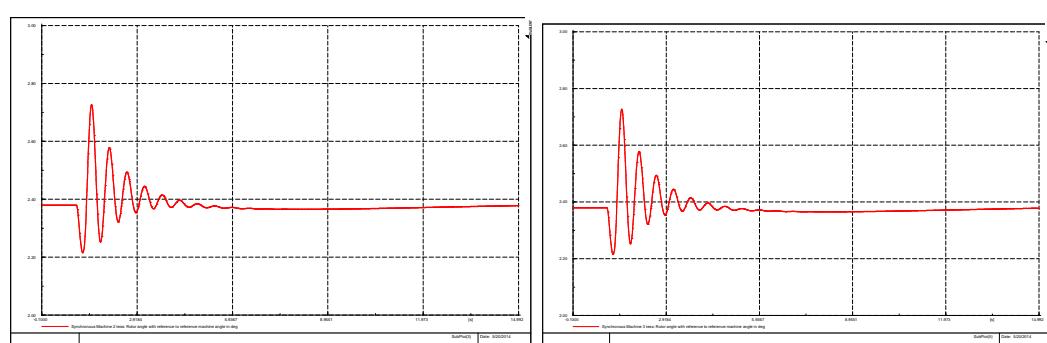
(a)

(b)



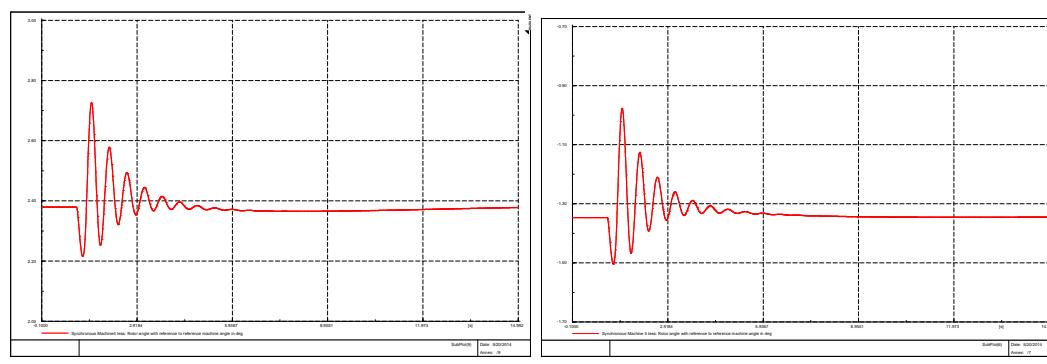
(c)

(d)



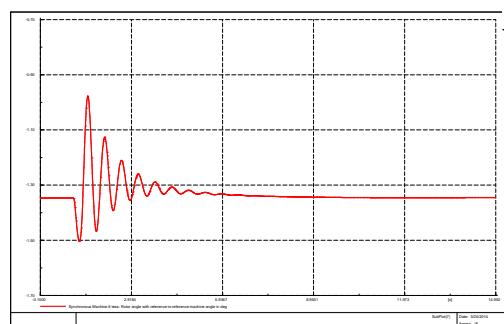
(e)

(f)



(g)

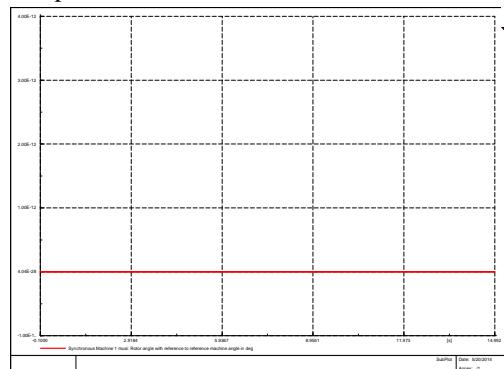
(h)



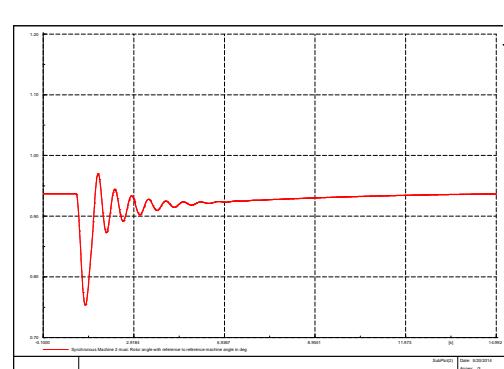
(i)

Gambar 2 grafik hasil simulasi respon sudut generator tanpa tambahan DG dengan waktu pemutusan 250 milidetik (a) generator 1 musi, (b) generator 2 musi, (c) generator 3 musi, (d) generator 1 tess, (e) generator 2 tess, (f) generator 3 tess, (g) generator 4 tess, (h) generator 5 tess, (i) generator 6 tess.

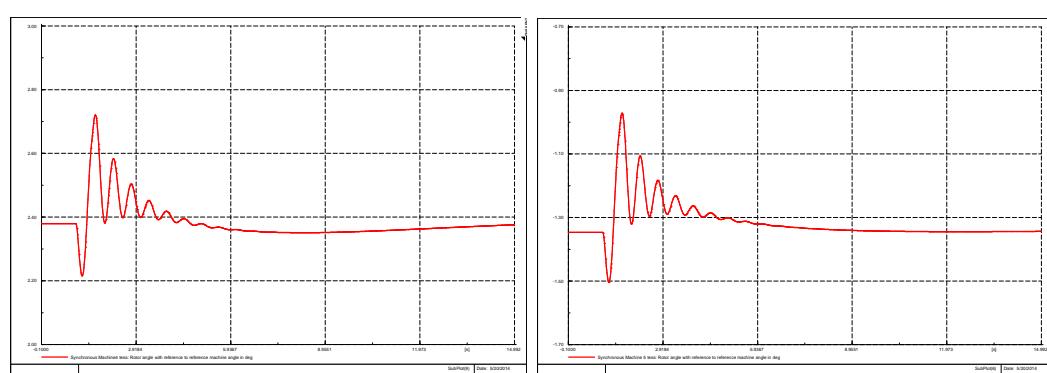
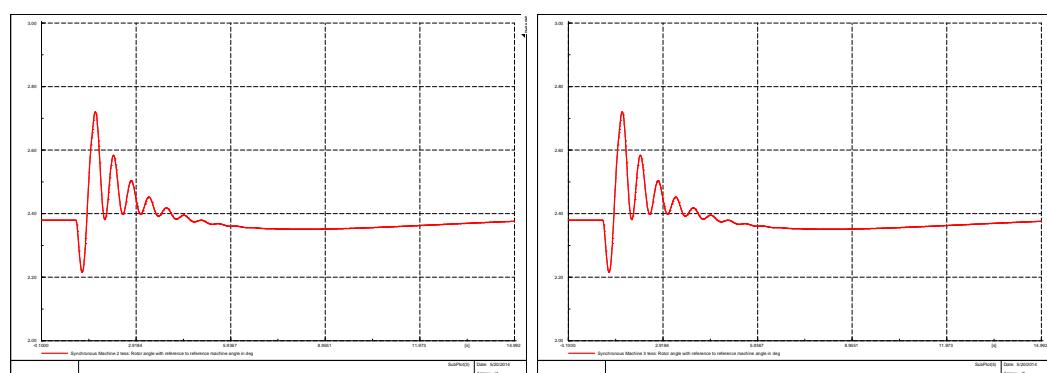
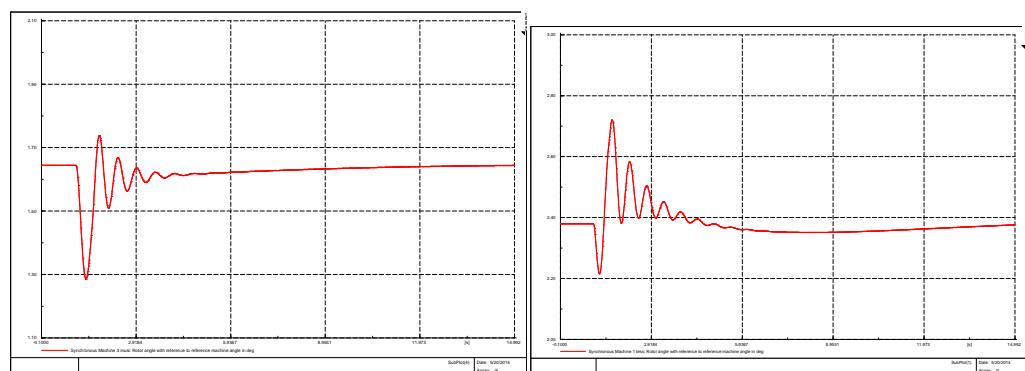
### Lampiran 3

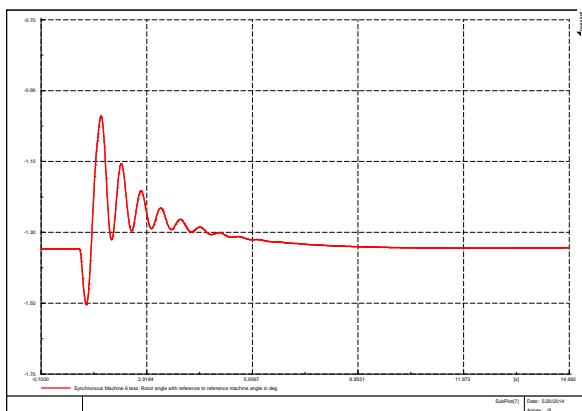


(a)



(b)

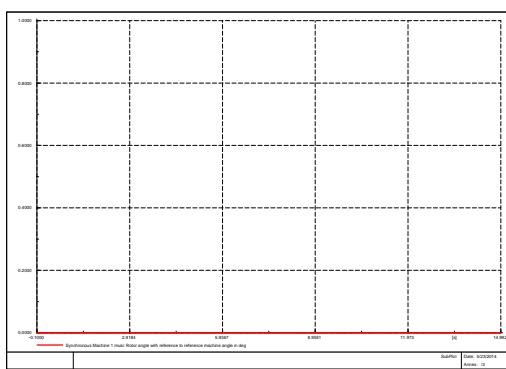




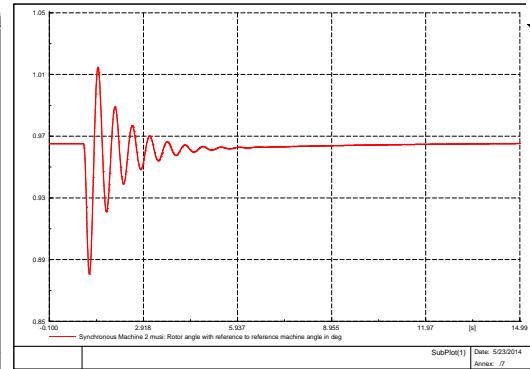
(i)

Gambar 3 grafik hasil simulasi respon sudut rotor generator tanpa tambahan DG dengan pemutusan gangguan 500 milidetik (a) grafik kestabilan sudut rotor generator 1 Musi, (b) kestabilan sudut rotor generator 2 Musi, (c) kestabilan sudut rotor generator 3 Musi, (d) kestabilan sudut rotor generator1 Tess, (e) kestabilan sudut rotor generator 2 Tess, (f) kestabilan sudut rotor generator 3 Tess, (g) kestabilan sudut rotor generator 4 Tess, (h) kestabilan sudut rotor generator 5 tess, (i) kestabilan generator 6 Tess.

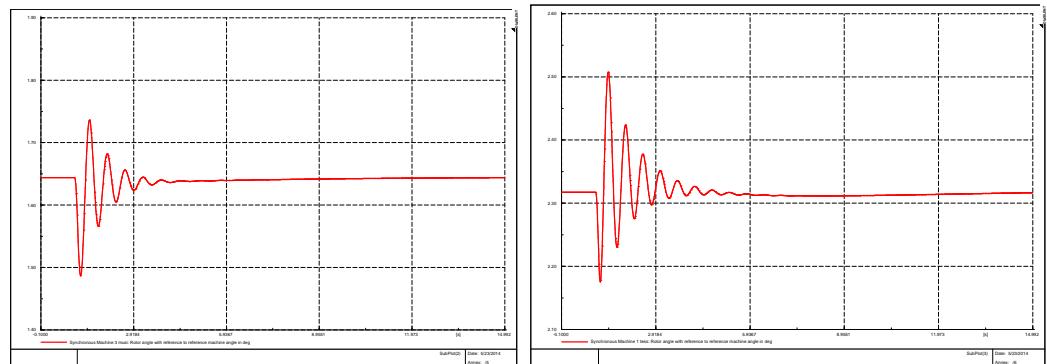
#### Lampiran 4



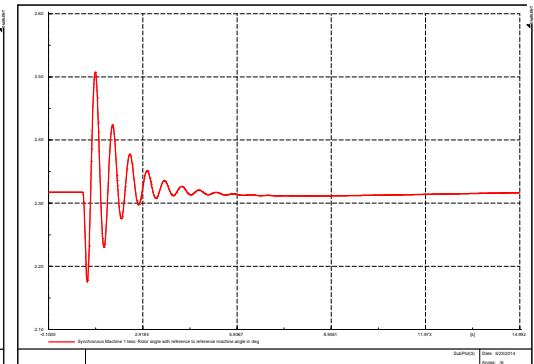
(a)



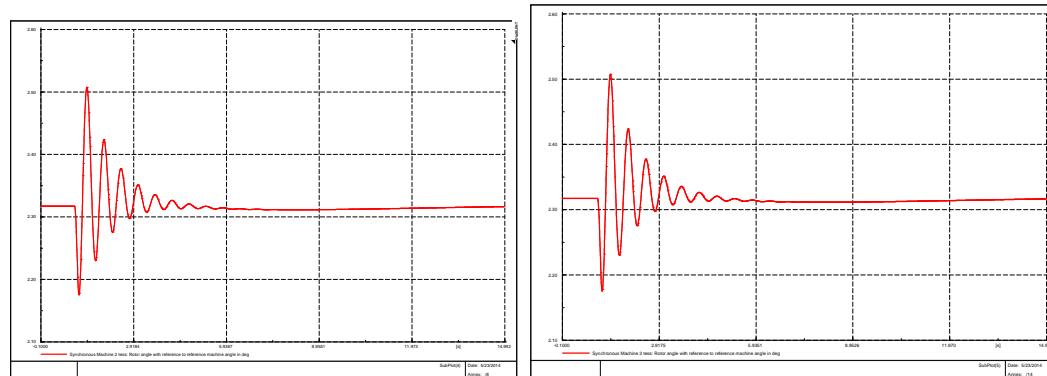
(b)



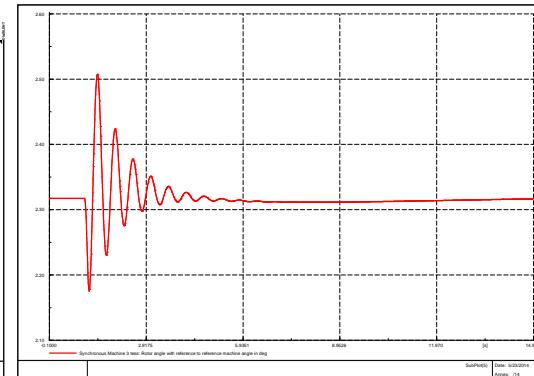
(c)



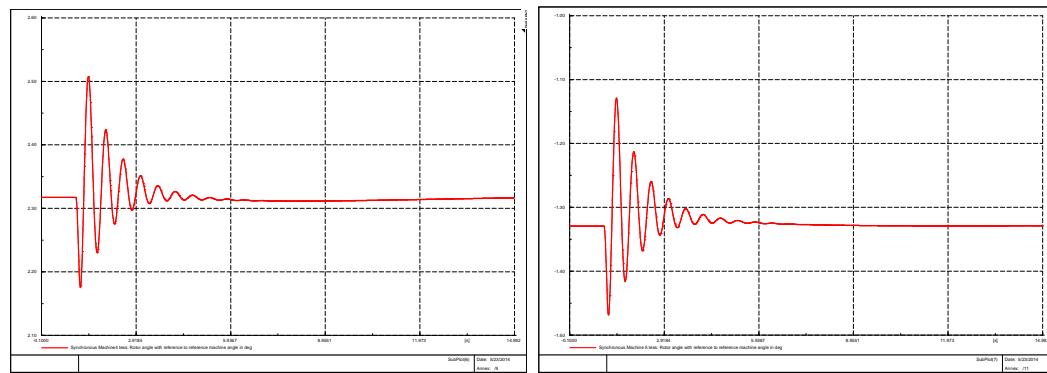
(d)



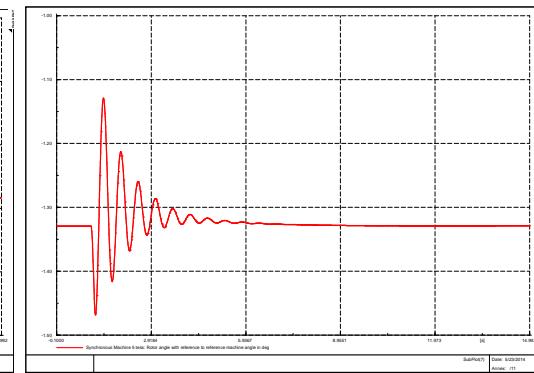
(e)



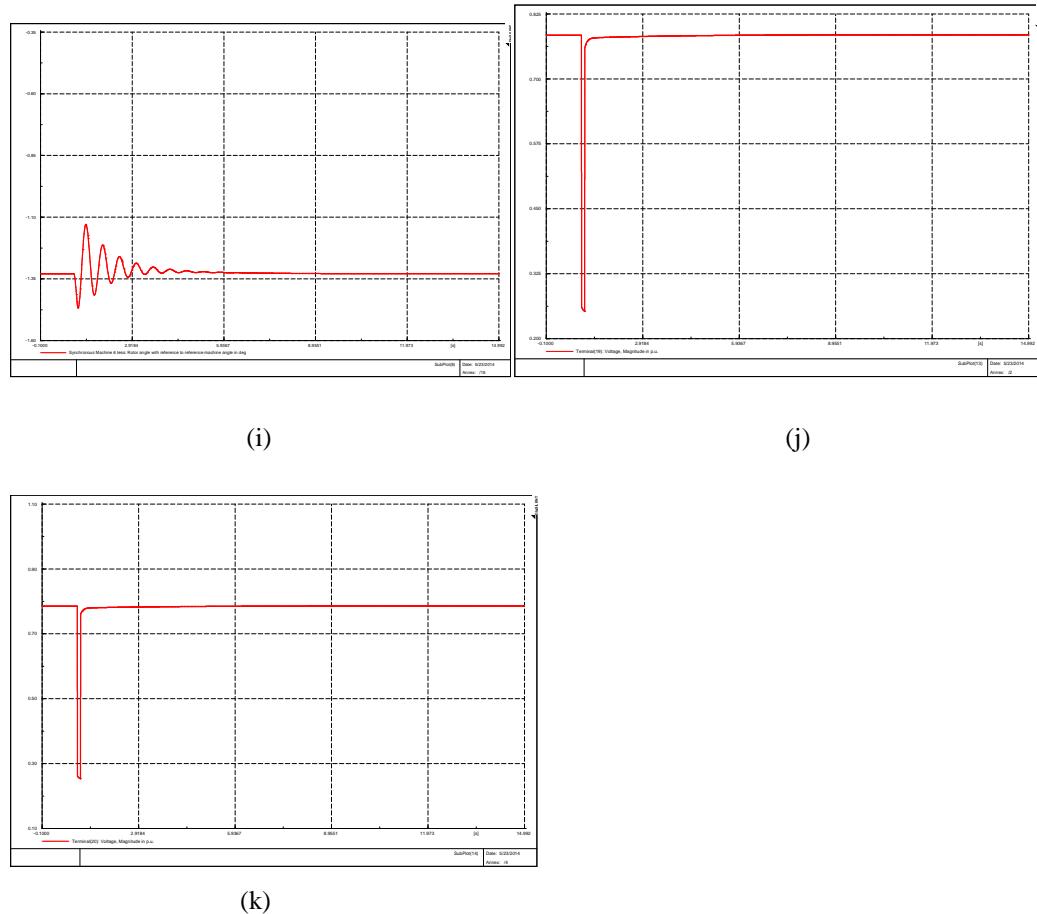
(f)



(g)

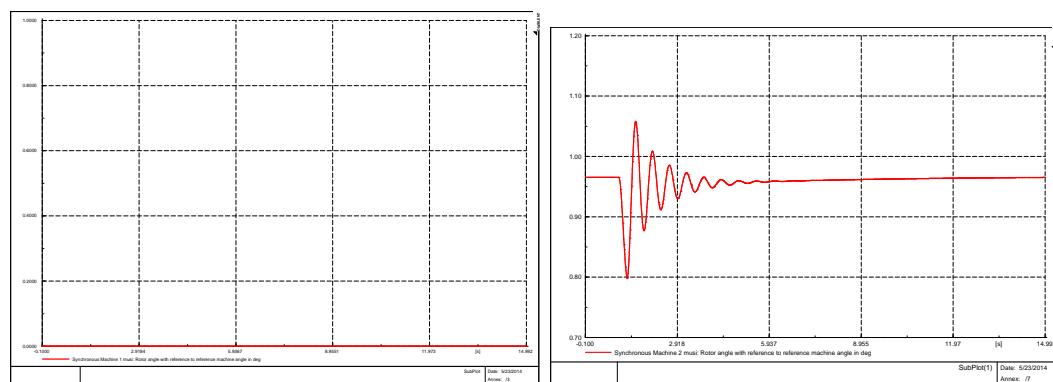


(h)



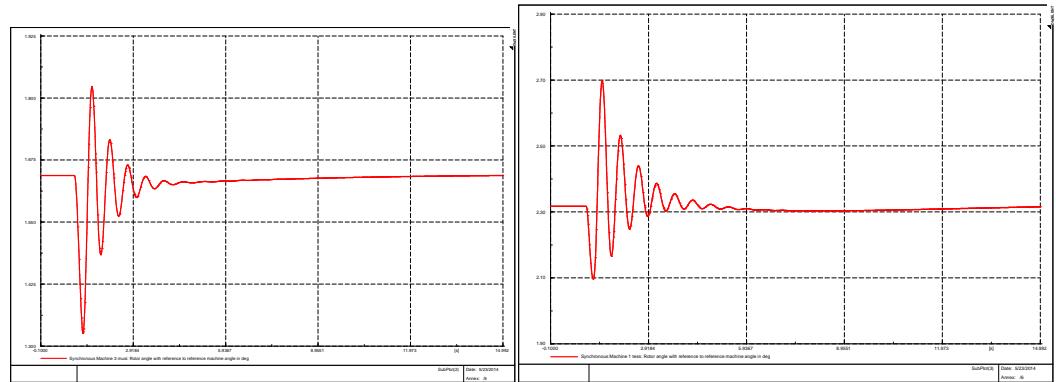
Gambar 4 grafikrespon sudut generator dengan tambahan DG PV pada pemutusan gangguan 100 milidetik (a) grafik kestabilan sudut rotor generator 1 musi, (b) kestabilan sudut rotor generator 2 musi, (c) kestabilan sudut rotor generator 3 musi, (d) kestabilan sudut rotor generator 1 tess, (e) kestabilan sudut rotor generator 2 tess, (f) kestabilan sudut rotor generator 3 tess, (g) kestabilan sudut rotor generator 4 tess, (h) kestabilan sudut rotor generator 5 tess, (i) kestabilan generator 6 tess, (j) PV unit 1, (k) PV unit 2

## Lampiran 5

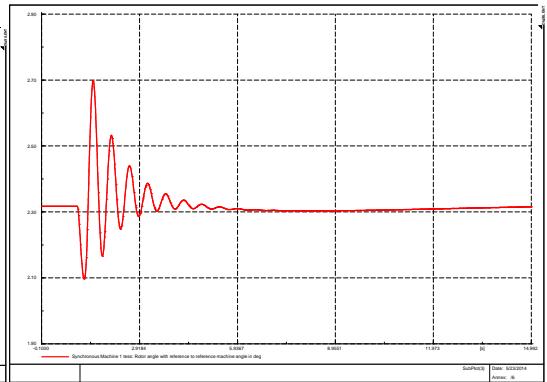


(a)

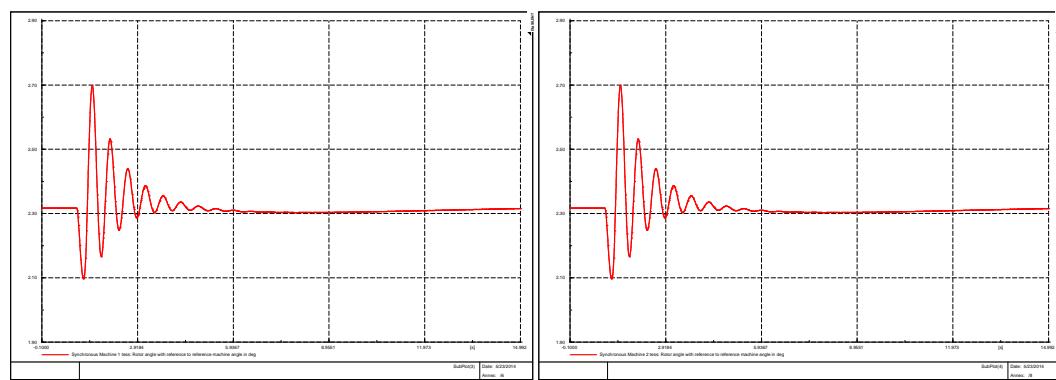
(b)



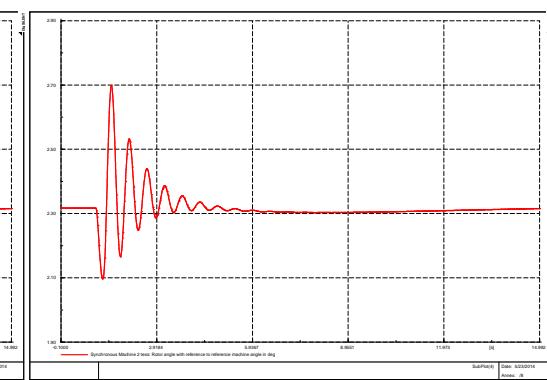
(c)



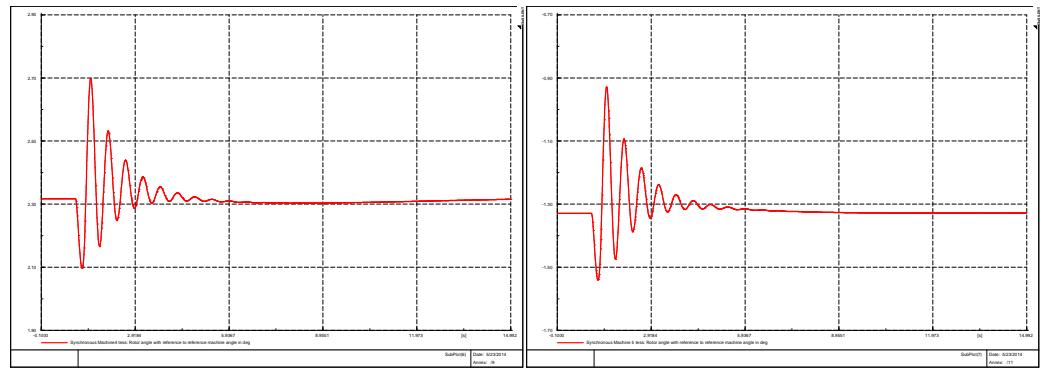
(d)



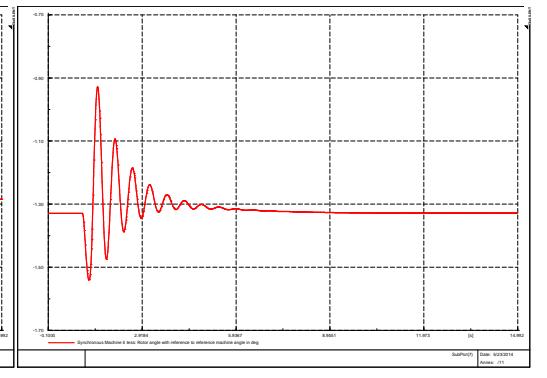
(e)



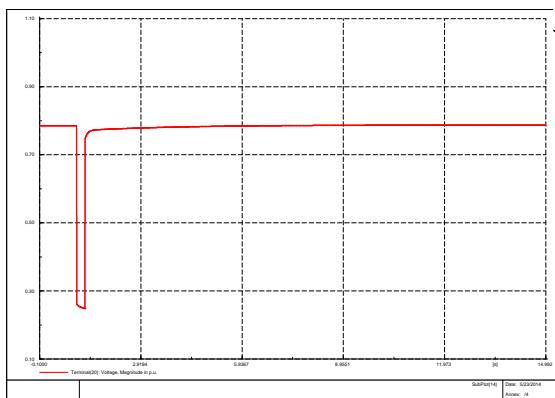
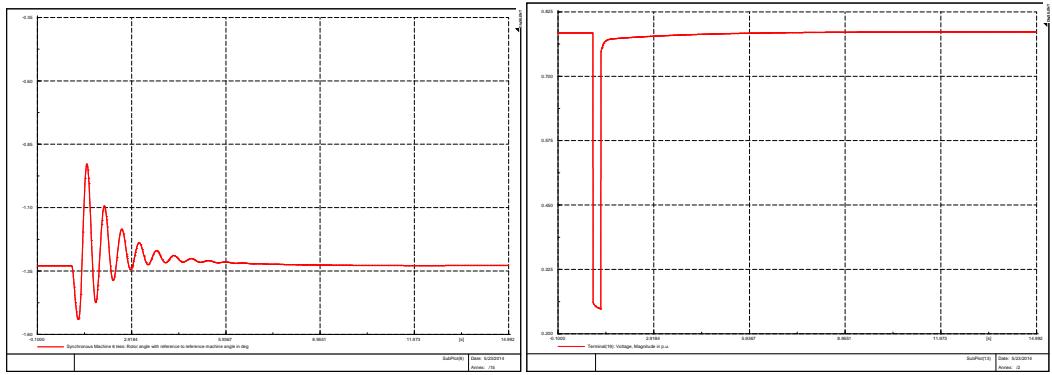
(f)



(g)

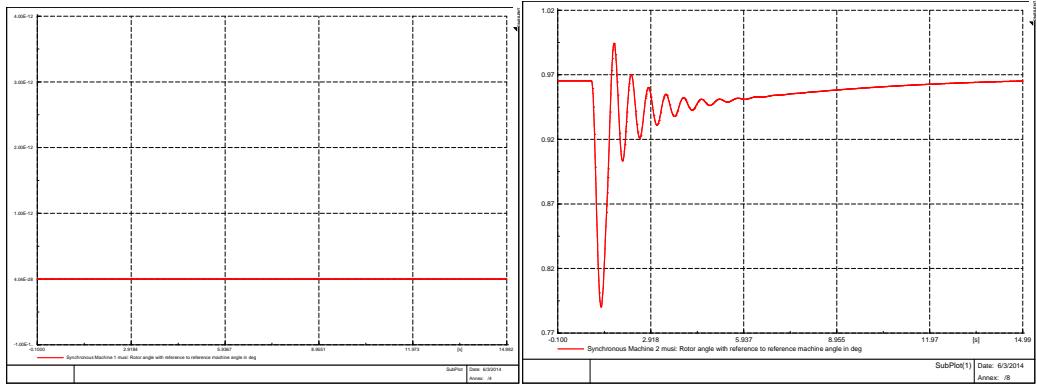


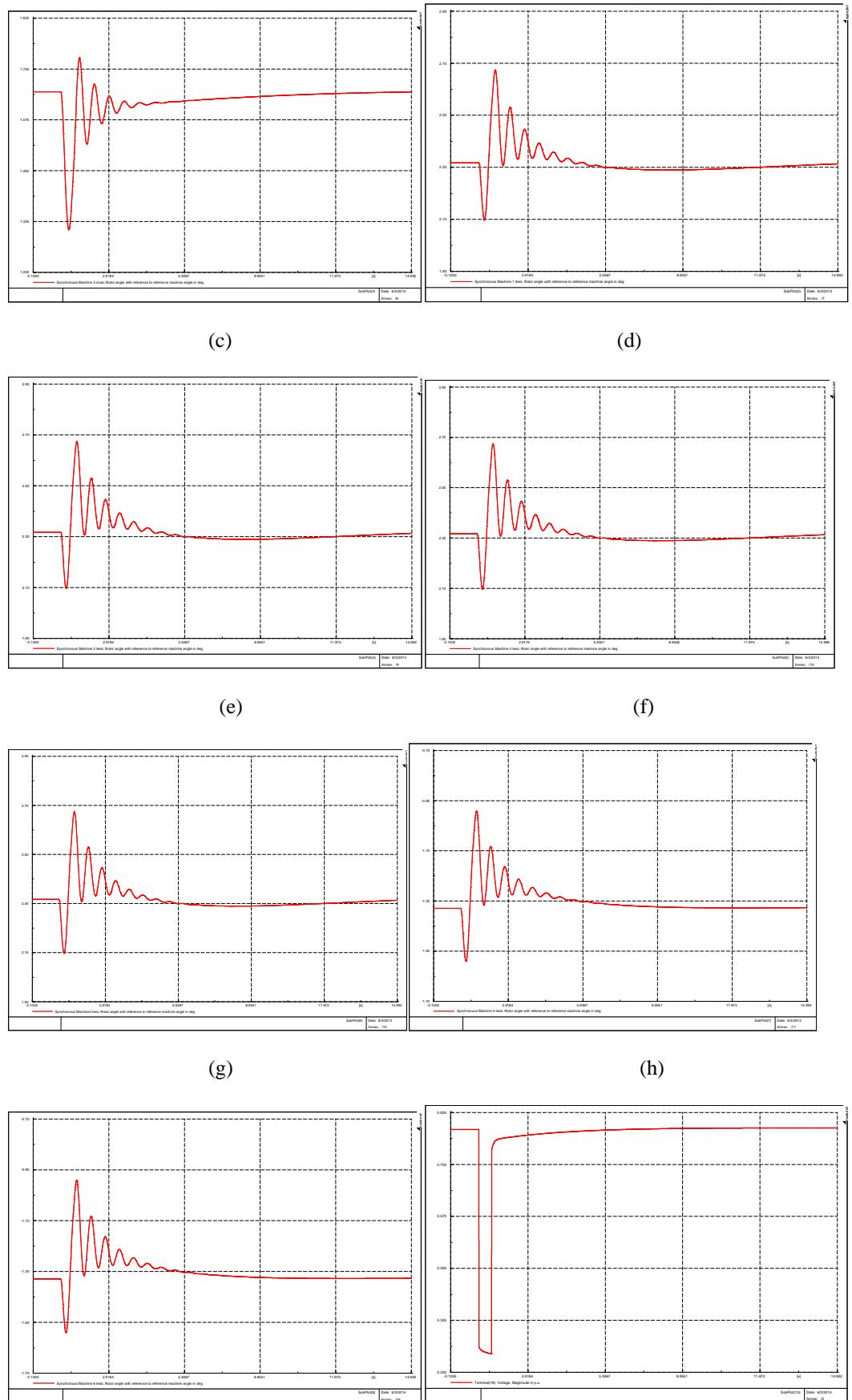
(h)

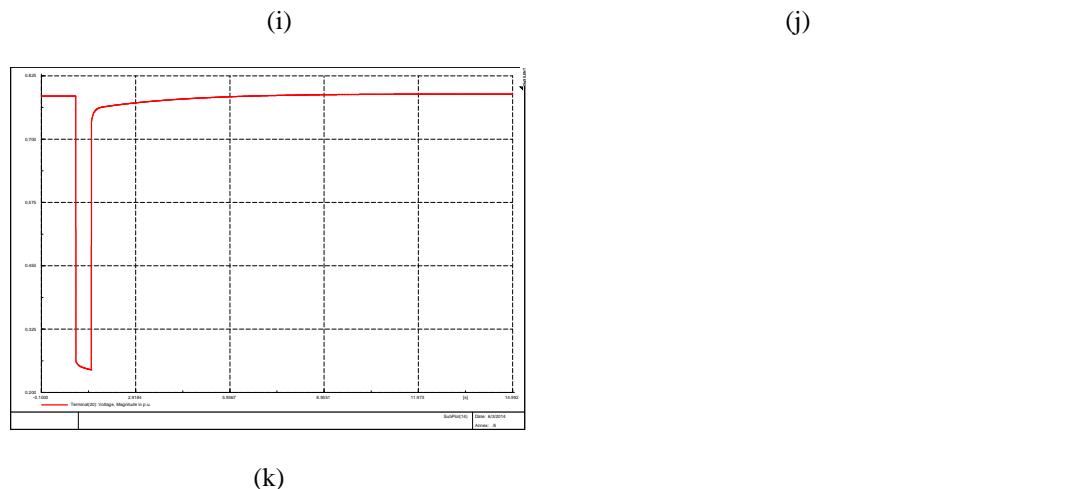


Gambar 5 grafik respon sudut rotor dengan tambahan DG PV pada pemutusan gangguan 250 milidetik (a) kestabilan sudut rotor generator 1 PLTA Musi,(b) kestabilan sudut rotor generator 2 PLTA Musi, (c) kestabilan sudut rotor generator 3 PLTA Musi, (d) kestabilan sudut rotor generator 1 PLTA Tess, (e) kestabilan sudut rotor generator 2 PLTA Tess, (f) kestabilan sudut rotor generator 3 PLTA Tess, (g) kestabilan sudut rotor generator 4 PLTA Tess, (h) kestabilan sudut rotor generator 5 PLTA Tess,(i) kestabilan generator 6 PLTA Tess.(j) pv 1, (k) pv 2

#### Lampiran 6

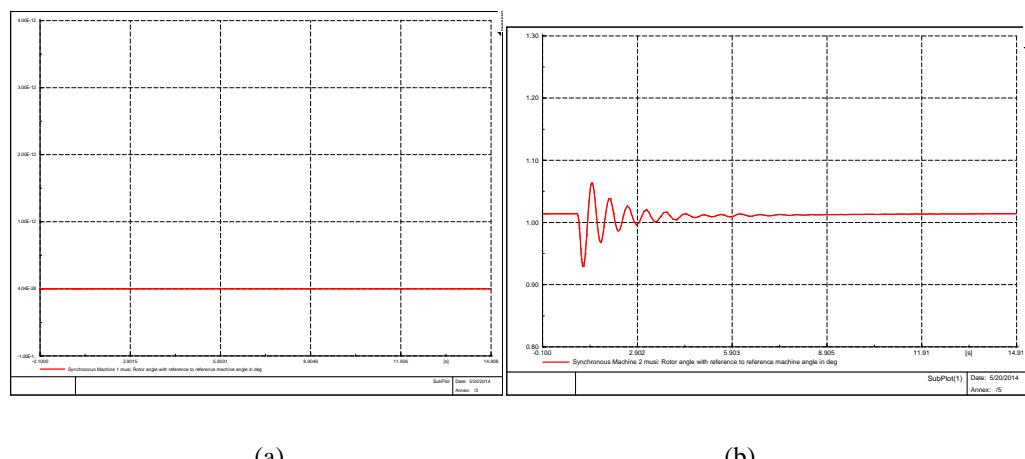


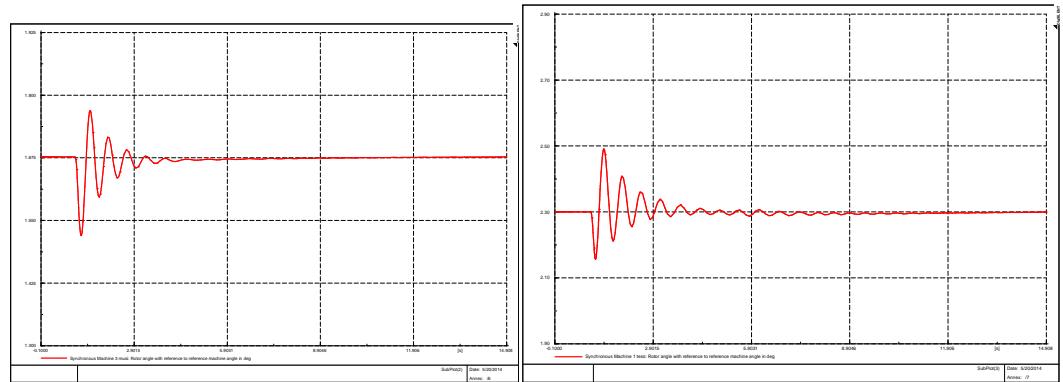




Gambar 6 Grafik kestabilan respon sudut rotor generator dengan penambahan DG PV pada pemutusan gangguan 500 milidetik (a) generator 1 PLTA Musi,(b) generator 2 PLTA Musi, (c) generator 3 PLTA Musi, (d) generator 1 PLTA Tess, (e) generator 2 PLTA Tess, (f) generator 3PLTA Tess, (g) generator 4 PLTA Tess, (h) generator 5 PLTA Tess, (i) kestabilan generator 6 PLTA Tess.(j) pv 1, (k) pv 2

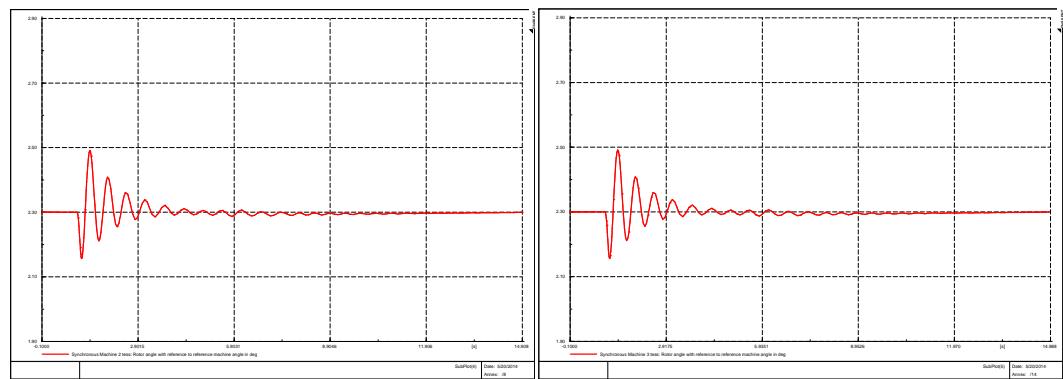
Lampiran 7





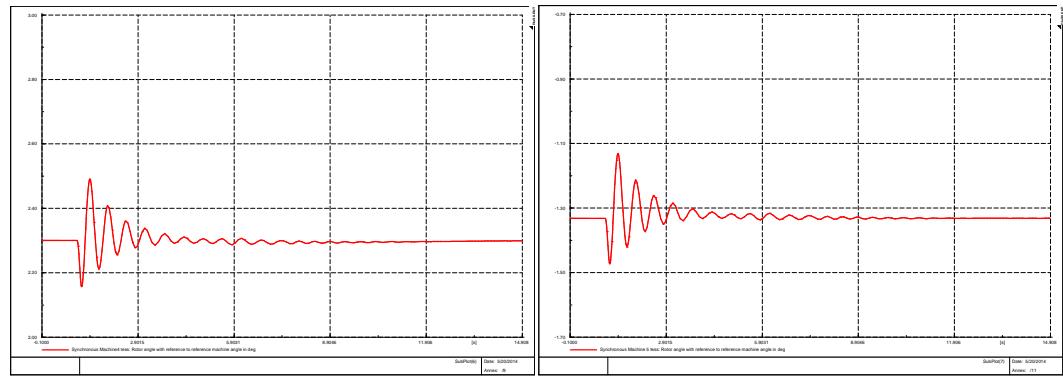
(c)

(d)



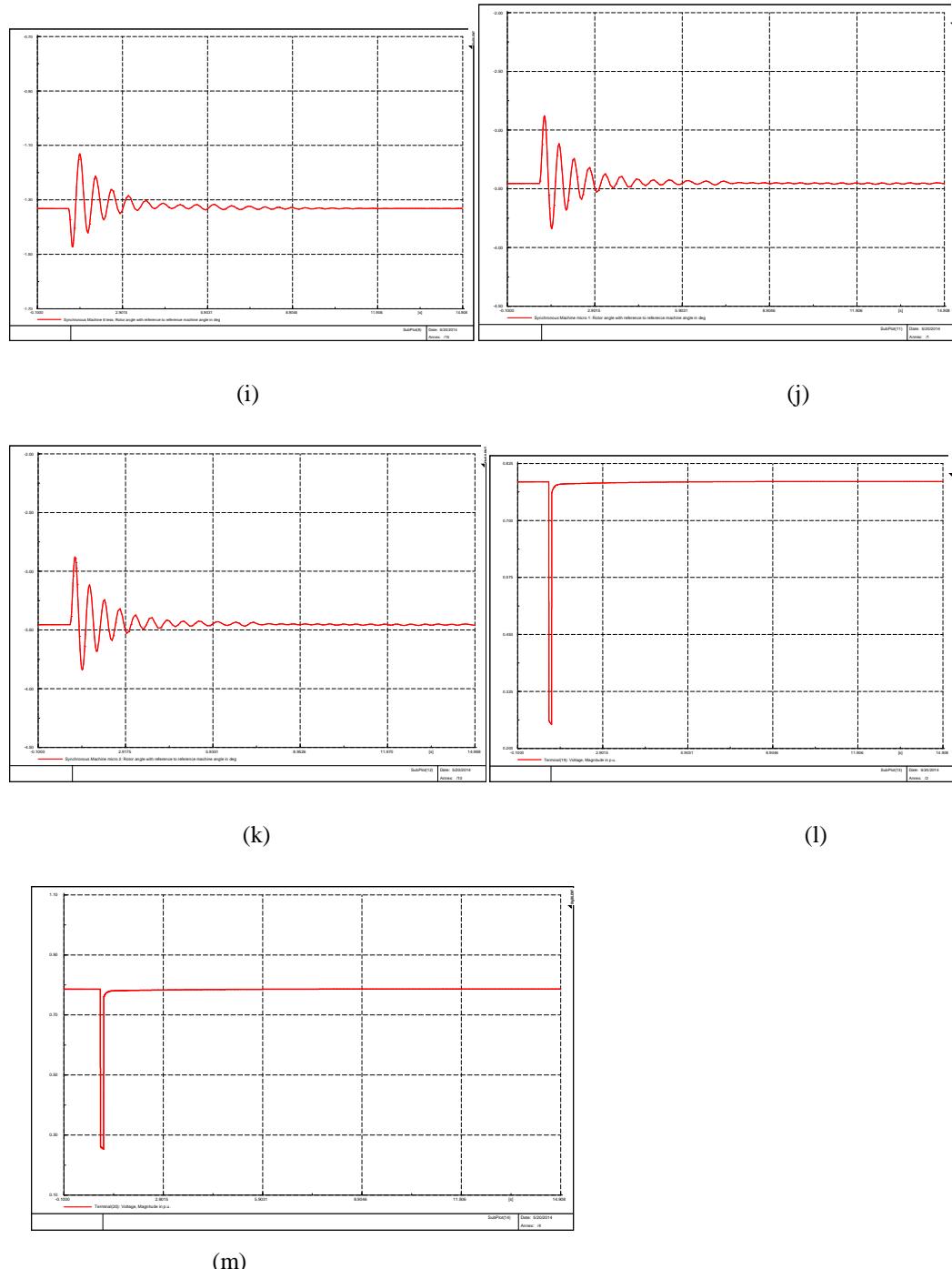
(e)

(f)



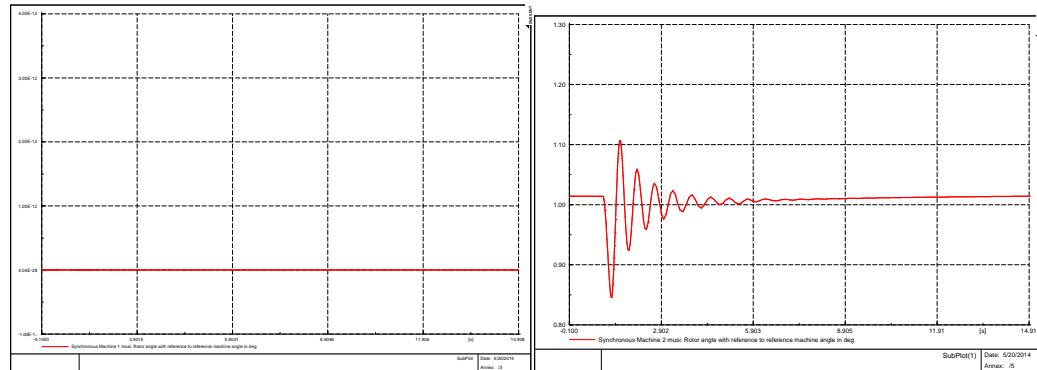
(g)

(h)



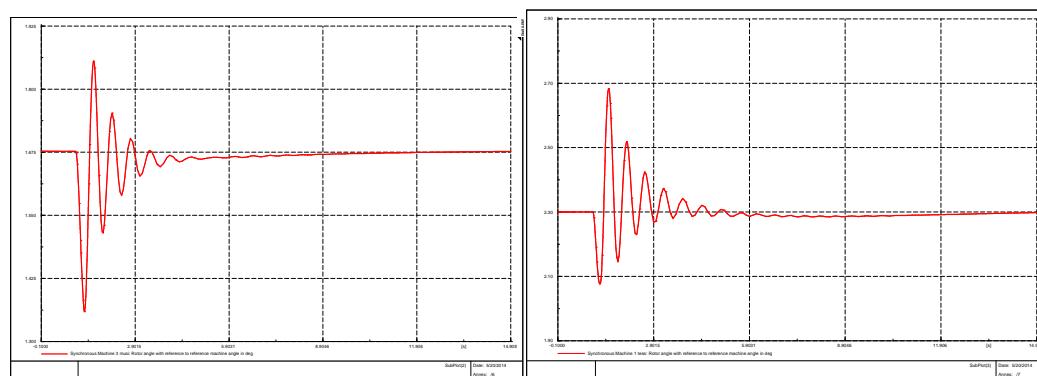
Gambar 7 grafik respon kestabilan sudut rotor dengan tambahan DG photovoltaic dan microhydro pada waktu pemutusan 100 milidetik (a) generator 1 musi, (b) generator 2musi, (c) generator 3 musi, (d) generator 1 tess, (e) generator 2 tess, (f) generator 3 tess, (g) generator 4 tess, (h) generator 5 tess, (i) generator 6 tess, (j)micro 1,(k) micro 2,(l) Pv 1, (m) pv 2.

Lampiran 8



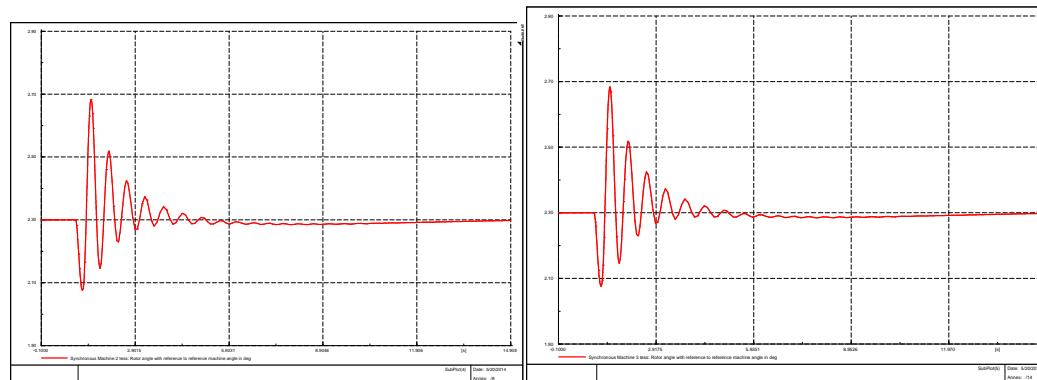
(a)

(b)



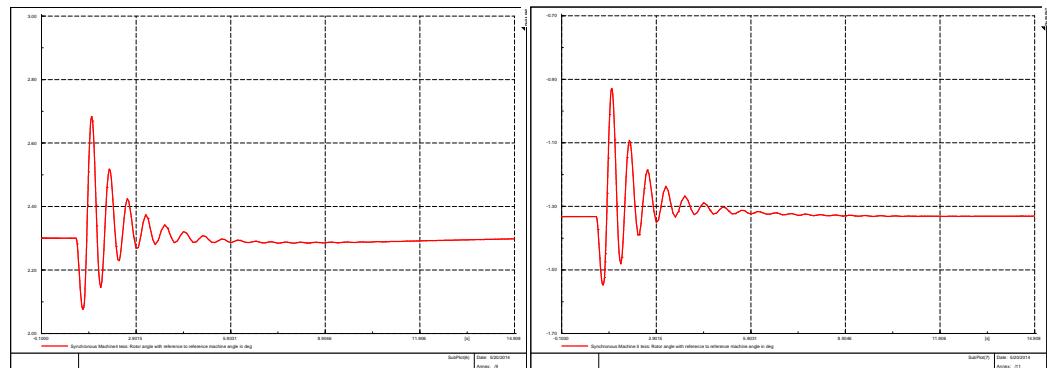
(c)

(d)



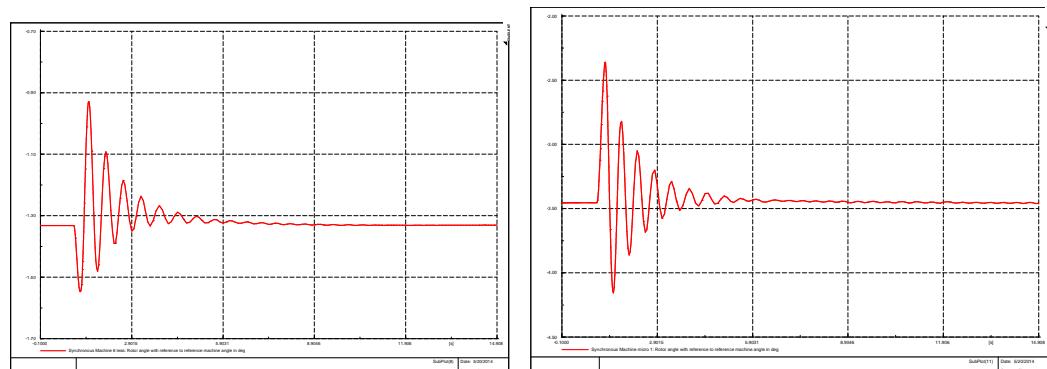
(e)

(f)



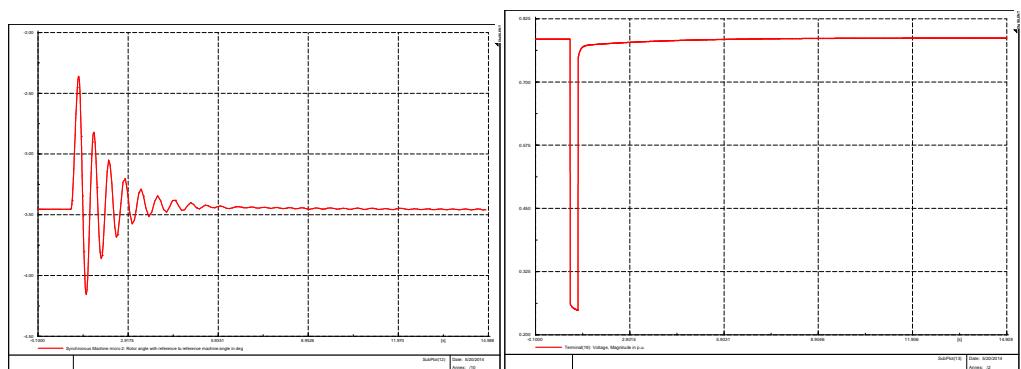
(g)

(h)



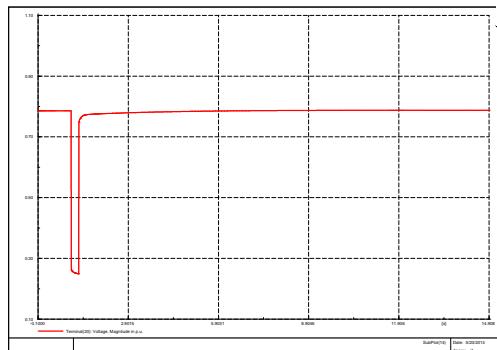
(i)

(j)



(k)

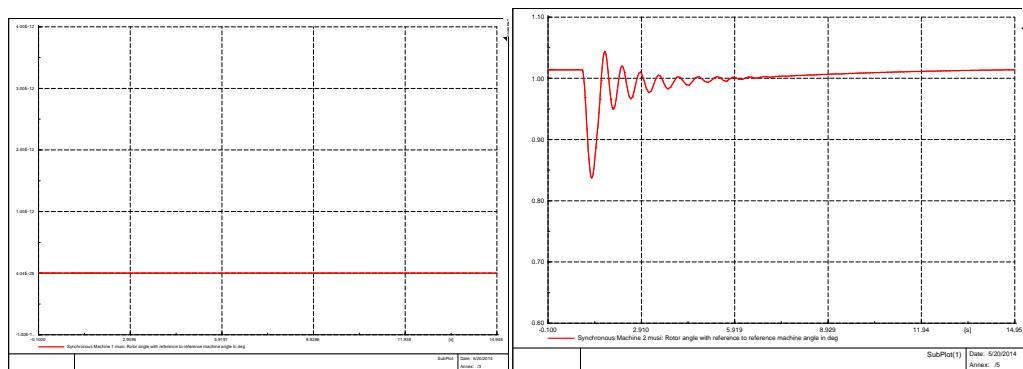
(l)



(m)

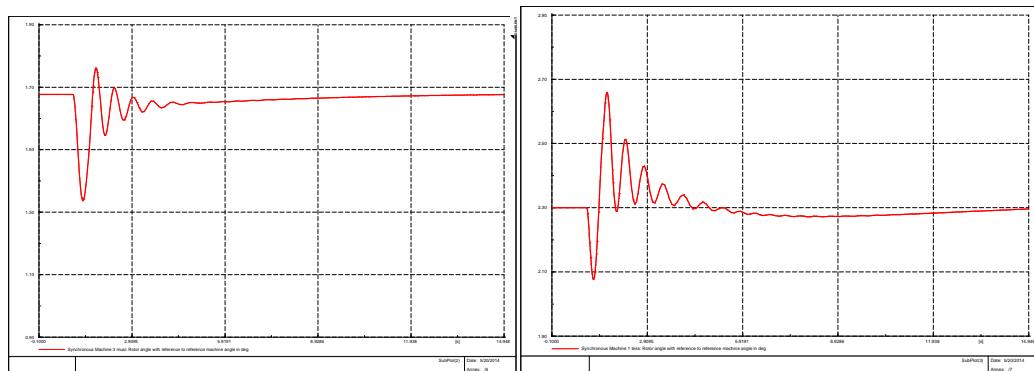
Gambar 4.40 grafik respon kestabilan sudut rotor terhadap penambahan DG PV dan microhydro pada pemutusan 250 milidetik(a) grafik kestabilan sudut rotor generator 1 musi, (b) kestabilan sudut rotor generator 2musi, (c) kestabilan sudut rotor generator 3 musi, (d) kestabilan sudut rotor generator 1 tess, (e) kestabilan sudut rotor generator 2 tess, (f) kestabilan sudut rotor generator 3 tess, (g) kestabilan sudut rotor generator 4 tess, (h) kestabilan sudut rotor generator 5 tess, (i) kestabilan generator 6 tess, (j)micro 1,(k) micro 2, (l) Pv 1, (m) pv 2.

#### Lampiran 9



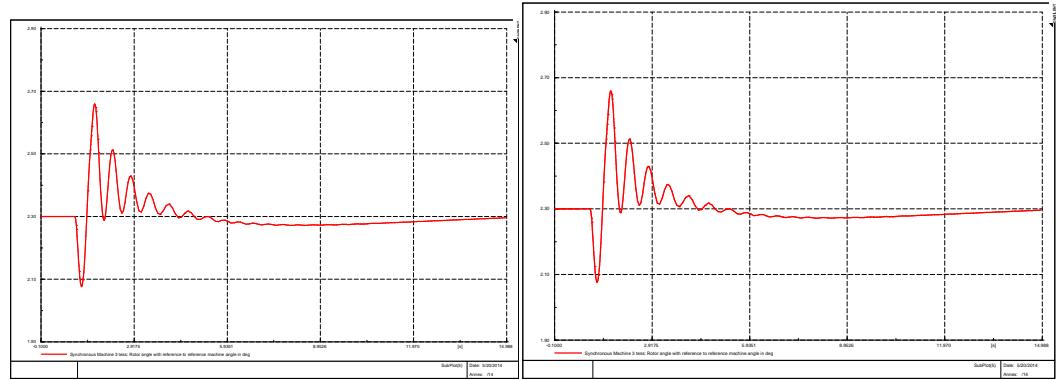
(a)

(b)

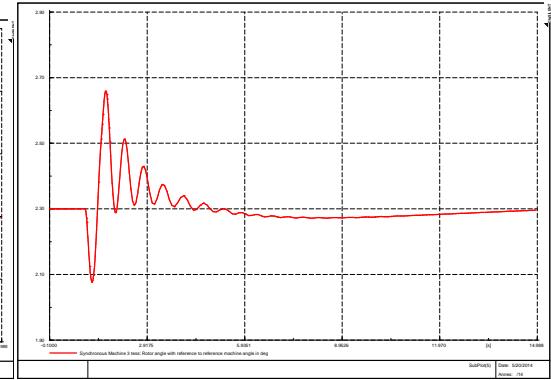


(c)

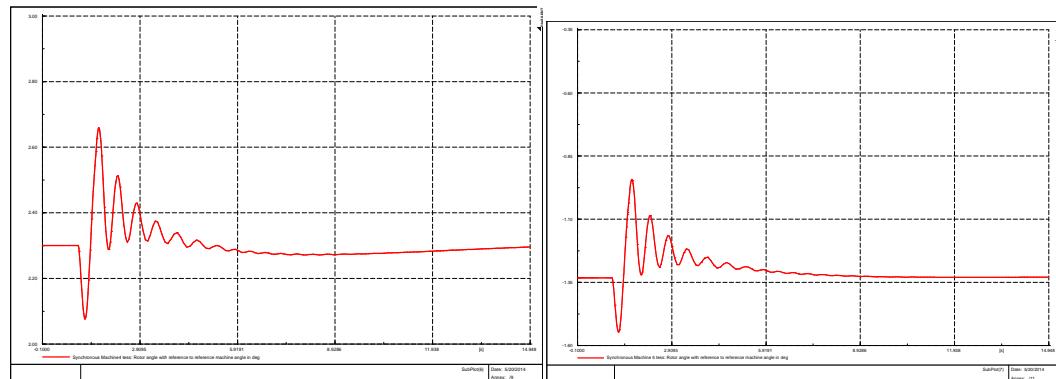
(d)



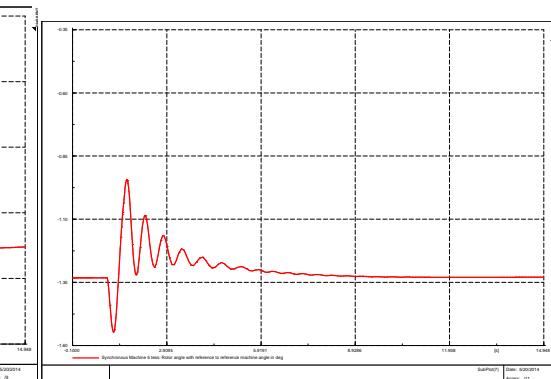
(e)



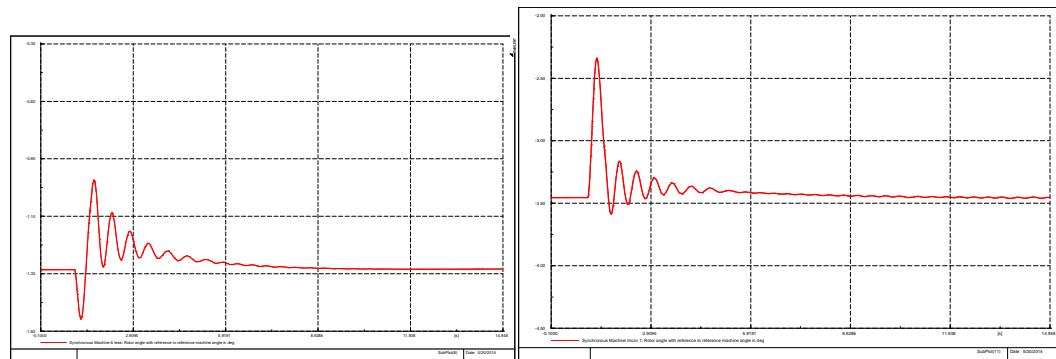
(f)



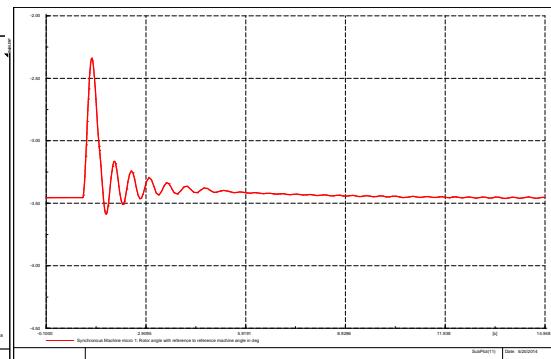
(g)



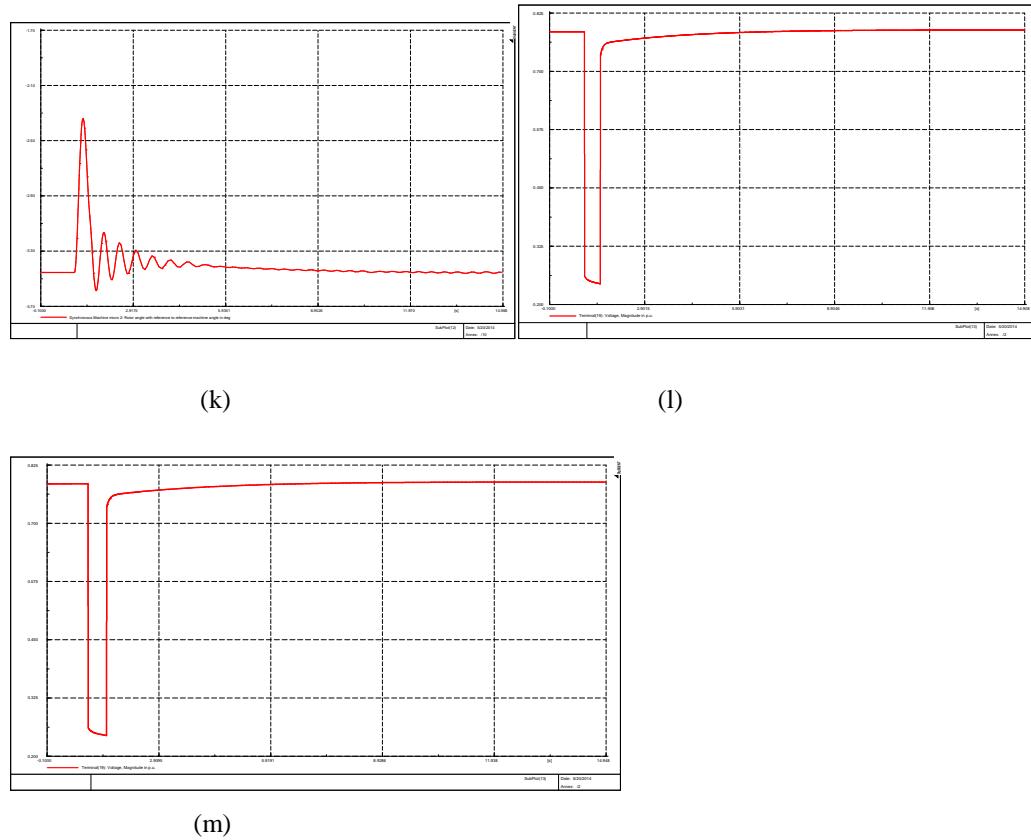
(h)



(i)



(j)



Gambar 4.44 grafik respon sudut rotor terhadap penambahan DG PV dan microhydro pada pemutusan gangguan 250 milidetik (a) grafik kestabilan sudut rotor generator 1 musi, (b) kestabilan sudut rotor generator 2musi, (c) kestabilan sudut rotor generator 3 musi, (d) kestabilan sudut rotor generator 1 tess, (e) kestabilan sudut rotor generator 2 tess, (f) kestabilan sudut rotor generator 3 tess, (g) kestabilan sudut rotor generator 4 tess, (h) kestabilan sudut rotor generator 5 tess, (i) kestabilan generator 6 tess, (j)micro 1,(k) micro 2, (l) Pv 1, (m) pv 2.

## **Spesifikasi Data Alternating Current Generator (AC Generator)**

### **Musi Hydroelectric Power Project Station Operation And Maintenance manual Generating Equipment**

The Generator were manufactured by ***Mitsubishi Electric Corporation*** in Japan.

#### **1. Type and Rating**

The generator is of three-phase, vertical shaft, suspended type synchronous alternator with a salient pole revolving field and is rated as follows :

- a. Rated Output : 84,500 kVA
- b. Rated Voltage : 11 kV
- c. Rated Current : 4,432 A
- d. Rated Frequency : 50 Hz
- e. Rated Speed : 500 rpm
- f. Rated Power Factor : 0.85 lagging

#### **2. Generator Performance**

##### **a. Generator Efficiencies**

Efficiencies of unit No.3 generator were calculated from the losses measured in accordance with IEC Publication 6034-2 and IEEE Std 115.

<u>Output</u>	<u>Factory test result: Unit 3</u>		<u>Guaranteed value</u>	
	<u>PF = 1.0</u>	<u>PF = 0.85</u>	<u>PF = 1.0</u>	<u>PF = 0.85</u>
84,500 kVA (100%)	98.49%	98.15% (A)	98.47%	98.12% (A)
67,600 kVA (80%)	98.35%	98.00% (B)	98.32%	97.95% (B)
50,600 kVA (60%)	98.07%	97.66% (C)	98.01%	97.59% (C)
33,800 kVA (40%)	97.39%	96.87% (D)	97.39%	96.76% (D)
Weighted Average		98.00%		97.95%

##### **b. Reactance and Short-Circuit Ratio**

	<u>Test result</u>	<u>Value in Tech</u>
(a) Direct Axis Synchronous reactance (Xd)	: 0.94 PU	0.94 PU
(b) Direct Axis transient reactance (Xd')	: 0.24 PU	0.24 PU (unsat.)
(c) Direct Axis Subtransient reactance (Xd'')	: 0.17 PU	0.17 PU (unsat.)
(d) Quadrature Axis Subtransient reactance (Xq'')	: 0.19 PU	0.17 PU (unsat.)
(e) Zero Sequence reactance (X <sub>0</sub> )	: 0.12 PU	0.12 PU
(f) Negative Sequence reactance (X <sub>2</sub> )	: 0.18 PU	0.17 PU
(g) Short circuit Ratio	: 1.05	More than 1.0

