



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS STATIS DAN DINAMIS STABILITAS TEGANGAN  
SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd.**

**SKRIPSI**

**CHAIRY WAHYU WINANTI**

**0706163634**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS STATIS DAN DINAMIS STABILITAS TEGANGAN  
SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd.**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**CHAIRY WAHYU WINANTI**

**0706163634**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber baik dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Chairy Wahyu Winanti

NPM : 0706163634

Tanda Tangan : 

Tanggal : 24 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Chairy Wahyu Winanti  
NPM : 0706163634  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : ANALISIS STATIS DAN DINAMIS STABILITAS  
TEGANGAN SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES  
Ltd.

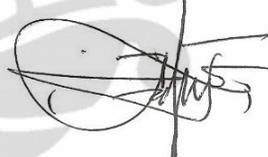
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA

(  )

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT

(  )

Penguji : Aji Nur Widyanto, ST, MT

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur hanya kepada Allah SWT karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih memiliki kekurangan. Karenanya, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam rangka pembelajaran terus-menerus. Banyak pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga penulis atas cinta dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis,
2. Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA, selaku Dosen Pembimbing,
3. Bapak Tompiner N, Kak Nurhadi P, dan Bapak Arif Kapa selaku Pembimbing di CNOOC SES Ltd.,
4. Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT., atas arahan dan bimbingannya,
5. Kakak-kakak terbaik (Kak Arif, Dallih, Kak Tinjo, Kak Ardi, dan Kak Kahlil) atas bantuan dan *refreshingnya*,
6. Rizky P. A. N. atas bantuannya nge-MATLAB,
7. Teman-teman Elektro UI angkatan 2007 yang selalu memberikan tawa ketika penat ^\_^,
8. Seluruh asisten laboratorium TTPL (Ari, Pandu, Pungki, Danjosh, Wilman, Andigan, dan Tyo) atas keceriaan tiap harinya,

Dan semua pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini, namun tidak dapat disebutkan satu persatu. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat yang seluas-luasnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 24 Juni 2011

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Chairy Wahyu Winanti  
NPM : 0706163634  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISIS STATIS DAN DINAMIS STABILITAS TEGANGAN  
SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd.

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 24 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Chairy Wahyu Winanti)

## ABSTRAK

Nama : Chairy Wahyu Winanti  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Statis dan Dinamis Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.

Adanya gangguan pada sistem tenaga listrik dapat memicu ketidakstabilan tegangan sistem. Ketidakstabilan tegangan sistem dapat menyebabkan runtuh tegangan yang kemudian berakhir dengan *black out* sebagian ataupun seluruh sistem. Sehingga penting untuk menjaga stabilitas tegangan sistem. Pada skripsi ini dibahas tentang analisis statis dan dinamis stabilitas tegangan sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. dimana sistem menggunakan skema pelepasan beban *undervoltage*. Digunakan perangkat lunak ETAP 7.0.0 untuk simulasi aliran daya dan simulasi *transient analysis* pada sistem. Metode kurva Q-V (analisis statis) digunakan sebagai pendekatan pada keadaan operasi normal dengan menggunakan simulasi aliran daya, sedangkan analisis dinamis digunakan pada simulasi *transient analysis* dengan mengatur lima skenario gangguan besar. Dengan metode kurva Q-V didapatkan bahwa bus beban pada daerah Utara rentan mengalami ketidakstabilan tegangan jika terjadi kenaikan/penambahan beban, sedangkan tegangan bus beban di daerah Selatan dan Tengah lebih stabil. Berdasarkan analisis dinamis, sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. dapat mengembalikan stabilitas tegangannya setelah dilakukan pelepasan beban *undervoltage* dengan kapasitas yang berbeda dalam setiap skenario sehingga adanya skema pelepasan beban *undervoltage* sudah cukup efektif untuk mencegah terjadinya runtuh tegangan (*voltage collapse*).

Kata kunci: analisis statis, analisis dinamis, runtuh tegangan, kuva Q-V, *transient analysis*

## ABSTRACT

Name : Chairy Wahyu Winanti  
Major : Electrical Engineering  
Title : Static and Dynamic Analysis of CNOOC SES Ltd. Power System  
Voltage Stability

In a power system, disturbances can trigger into instability of system voltage. Instability of system voltage can lead to voltage collapse that ended with the partition or the whole system black out. So, it is important to maintain the system voltage stability. In this paper will be explained about static and dynamic analysis of CNOOC SES Ltd. voltage stability where the system uses undervoltage load shedding scheme. ETAP 7.0.0 software is used to simulate load flow and transient analysis to the system. Q-V curve method (static analysis) is used as an approach to the normal operation condition using load flow simulation, while dynamic analysis is used in transient analysis simulation by setting five large disturbance scenarios. Using Q-V curve method, obtained that the load buses in the North Area are prone to voltage instability if there is an increase or addition of load, while the load buses in South and Central Area are more voltage stable. Based on dynamic analysis, CNOOC SES Ltd. power system can maintain the voltage stability after holding undervoltage load shedding for different load shedding capacity in each scenario, so the undervoltage load shedding scheme is effective enough to prevent voltage collapse.

Keywords: static analysis, dynamic analysis, voltage collapse, Q-V curve, transient analysis

# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penulisan .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metodologi Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
BAB II LANDASAN TEORI .....	4
2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik .....	4
2.2 Stabilitas Tegangan .....	9
2.2.1 Sistem Pembangkitan.....	11
2.2.2 Sistem Transmisi.....	15
2.2.3 Beban.....	17
2.2.4 Kompensator Daya Reaktif .....	18
2.3 <i>Voltage Collapse</i> .....	21
2.4 Analisis Stabilitas Tegangan.....	22
2.4.1 Analisis Statis .....	22
2.4.1 Analisis Dinamis.....	23
2.5 Upaya untuk Mengatasi Masalah Stabilitas Tegangan.....	24

BAB III DESKRIPSI SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd. ....	26
3.1 Pembagian Daerah Operasi CNOOC SES Ltd .....	26
3.2 Simulasi Aliran Daya .....	28
3.2.1 Sistem Pembangkitan .....	29
3.2.1.1 Mode Operasi Generator.....	29
3.2.1.2 Kemampuan Daya Reaktif.....	30
3.2.1.3 Governor .....	30
3.2.1.4 <i>Exciter</i> .....	31
3.2.2 Sistem Transmisi dan Distribusi.....	31
3.2.3 Beban.....	32
3.3 Simulasi Analisis Transien .....	33
3.3.1 Rele Daya Berarah ( <i>Directional Power Relay</i> ) .....	33
3.3.2 <i>Undervoltage Relay</i> .....	34
3.3.3 Skenario Gangguan Besar .....	38
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS .....	41
4.1 Simulasi dan Analisis Aliran Daya (Analisis Statis).....	41
4.1.1 Analisis Kurva Q-V .....	41
4.1.2 Batas Stabilitas Tegangan .....	46
4.2 Simulasi dan Analisis Transien (Analisis Dinamis).....	49
4.2.1 S1: Lepasnya Generator PABL-G101A .....	50
4.2.2 S2: Lepasnya Generator SFX GTG1 .....	56
4.2.3 S3: Gangguan Tiga Fasa pada <i>Line</i> Pabelokan-Zelda (C-2_A) .....	63
4.2.4 S4: Gangguan Tiga Fasa pada <i>Line</i> Pabelokan-Krisna (C-3_A) .....	69
4.2.5 S5: Gangguan Tiga Fasa pada <i>Line</i> Zelda-Karmila (C-18).....	74
BAB V KESIMPULAN.....	80
DAFTAR ACUAN .....	81

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Generator pada Keadaan Operasi Normal dari Load Flow ETAP 7.0.0.....	26
Tabel 3.2	Pengaturan Generator pada Simulasi .....	29
Tabel 3.3	Data Transformator OLTC pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd .....	32
Tabel 3.4	Data <i>Undervoltage Relay</i> .....	34
Tabel 3.5	Data <i>Undervoltage Relay</i> dengan Pengaturan Tegangan Minimum di bawah 85% Tegangan Nominal.....	37
Tabel 4.1	Sensitivitas Q-V Seluruh Bus Beban.....	41
Tabel 4.2	Batas Stabilitas Tegangan Bus Beban di Daerah Operasi Selatan ( <i>South</i> ) dan Daerah Operasi Tengah ( <i>Central</i> ).....	47
Tabel 4.3	Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S1.....	50
Tabel 4.4	Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S2.....	56
Tabel 4.5	Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S3.....	63
Tabel 4.6	Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S4.....	69
Tabel 4.7	Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S5.....	74

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	5
Gambar 2.2	Contoh Sederhana yang Menunjukkan Situasi Ekstrim .....	8
Gambar 2.3	Klasifikasi Stabilitas Tegangan.....	11
Gambar 2.4	Batas Panas Arus Jangkar .....	12
Gambar 2.5	Batas Panas Arus Medan .....	13
Gambar 2.6	Batas Pemanasan pada Wilayah Ujung Generator.....	13
Gambar 2.7	Pengaruh dari Pengurangan Tegangan Jangkar terhadap Kurva Kemampuan Generator.....	14
Gambar 2.8	Kurva V-P pada Sistem .....	16
Gambar 2.9	Contoh Kurva Q-V yang Dinormalisasi .....	23
Gambar 3.1	Pembagian Daerah Operasi CNOOC SES Ltd. ....	27
Gambar 3.2	Posisi Skenario Gangguan pada Simulasi Transien .....	40
Gambar 4.1	Kurva Q-V Bus163.....	45
Gambar 4.2	Kurva Q-V Bus WIDG11 .....	46
Gambar 4.3	Grafik Daya Aktif Generator pada S1 .....	50
Gambar 4.4	Grafik Daya Aktif Generator pada S1(Sistem tanpa UVR).....	52
Gambar 4.5	Grafik Tegangan Bus Generator pada S1 .....	52
Gambar 4.6	Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator pada S1 .....	53
Gambar 4.7	Grafik Daya Reaktif Generator pada S1.....	53
Gambar 4.8	Grafik Tegangan Bus150 dan bus WIDG11 pada S1.....	55
Gambar 4.9	Grafik Tegangan Bus150 dan bus WIDG11 pada S1 (Sistem tanpa UVR).....	55
Gambar 4.10	Grafik Daya Aktif Generator pada S2 .....	58
Gambar 4.11	Grafik Daya Aktif Generator pada S2 (Sistem tanpa UVR).....	59
Gambar 4.12	Grafik Tegangan Bus Generator pada S2 .....	60
Gambar 4.13	Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator pada S2 .....	60
Gambar 4.14	Grafik Daya Reaktif Generator pada S2.....	61
Gambar 4.15	Grafik Tegangan CINB BUS B, INTB21, dan WIDE21 pada S2 .....	62

Gambar 4.16	Grafik Tegangan CINB BUS B, INTB21, dan WIDE21 pada S2 (Sistem tanpa UVR) .....	62
Gambar 4.17	Grafik Daya Aktif Generator pada S3 .....	64
Gambar 4.18	Grafik Daya Aktif Generator pada S3 (Sistem tanpa UVR).....	65
Gambar 4.19	Grafik Tegangan Bus Generator pada S3 .....	66
Gambar 4.20	Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator pada S3 .....	66
Gambar 4.21	Grafik Daya Reaktif Generator pada S3.....	67
Gambar 4.22	Grafik Tegangan Bus150 dan WIDG11 pada S3 .....	68
Gambar 4.23	Grafik Tegangan Bus150 dan WIDG11 pada S3 (Sistem tanpa UVR) .....	68
Gambar 4.24	Grafik Daya Aktif Generator pada S4.....	70
Gambar 4.25	Grafik Daya Aktif Generator pada S4 (Sistem tanpa UVR).....	70
Gambar 4.26	Grafik Tegangan Bus Generator pada S4.....	71
Gambar 4.27	Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator pada S4.....	72
Gambar 4.28	Grafik Daya Reaktif Generator pada S4.....	72
Gambar 4.29	Grafik Tegangan Bus150, CINB BUS B, dan WIDG11 pada S4 .....	73
Gambar 4.30	Grafik Tegangan Bus150, CINB BUS B, dan WIDG11 pada S4 (Sistem tanpa UVR) .....	73
Gambar 4.31	Grafik Daya Aktif Generator pada S5 .....	75
Gambar 4.32	Grafik Daya Aktif Generator pada S5 (Sistem tanpa UVR).....	75
Gambar 4.33	Grafik Tegangan Bus Generator pada S5 .....	76
Gambar 4.34	Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator pada S5 .....	77
Gambar 4.35	Grafik Daya Reaktif Generator pada S5.....	77
Gambar 4.36	Grafik Tegangan CINB BUS B, T2 S, WIDD21, dan WIDG11 pada S5 .....	78
Gambar 4.37	Grafik Tegangan CINB BUS B, T2 S, WIDD21, dan WIDG11 pada S5 (Sistem tanpa UVR).....	78

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Stabilitas tegangan merupakan bagian penting dalam perencanaan dan operasi suatu sistem tenaga listrik. Setiap sistem tenaga listrik diharapkan dapat mempertahankan stabilitas tegangannya untuk menjaga ketersediaan suplai listrik secara kontinyu (*availability*) dengan kualitas daya yang baik dan meminimalisasi terjadinya pemadaman listrik (*black out*) total maupun sebagian.

Ketidakstabilan tegangan merupakan ketidakmampuan sistem untuk mempertahankan profil tegangan dalam batas yang diperbolehkan setelah terjadi gangguan atau perubahan konfigurasi sistem [1]. Adanya fluktuasi beban menyebabkan perubahan kebutuhan daya aktif dan reaktif secara kontinyu. Hal ini dapat dikatakan sebagai gangguan kecil yang dapat mengganggu stabilitas sistem tenaga listrik. Meningkatnya kebutuhan beban akan daya reaktif dapat mempengaruhi profil tegangan sistem. Jika didapatkan tegangan pada salah satu bus keluar dari batas yang diperbolehkan maka sangat dimungkinkan bagi sistem untuk mengalami ketidakstabilan tegangan / runtuh tegangan (*voltage collapse*). Di samping itu, terdapat beberapa gangguan besar yang dapat menjadi pemicu ketidakstabilan tegangan sistem, antara lain hubung singkat pada saluran transmisi, *switching* pada beban yang kapasitasnya cukup besar, dan lepasnya pembangkit. Diharapkan sistem stabil sehingga dapat mencapai kondisi operasi yang seimbang setelah mengalami gangguan.

Setiap komponen dalam sistem tenaga listrik memberikan pengaruh terhadap stabilitas tegangan sistem tersebut, termasuk sistem pembangkitan, sistem transmisi, karakteristik beban, dan kompensator daya reaktif. Beberapa hal yang secara spesifik dapat memicu ketidakstabilan tegangan, yaitu jarak yang jauh antara pembangkitan dan beban, aksi *on load tap changing* (OLTC) transformator, karakteristik beban yang tidak baik, serta koordinasi antara sistem kendali dan sistem proteksi yang buruk [1].

Selama beberapa tahun terakhir terjadi perubahan kapasitas beban, pembangkit, dan perubahan konfigurasi pada sistem tenaga listrik CNOOC SES

Ltd. Sehingga penting untuk dilakukan analisis stabilitas tegangan dengan meninjau kembali kesesuaian antara karakteristik beban, kemampuan pembangkit dalam menyuplai daya aktif dan daya reaktif, sistem transmisi (termasuk kinerja *on load tap changing* transformator) serta evaluasi penggunaan skema pelepasan beban *undervoltage* untuk menjaga dan mengoptimalkan stabilitas tegangan sistem.

Ketidakstabilan tegangan merupakan sebuah proses dinamis [2] sehingga dalam skripsi ini tidak hanya akan dilakukan simulasi berdasarkan metode analisis statis, melainkan juga analisis dinamis. Simulasi aliran daya akan dilakukan berdasarkan metode analisis statis sebagai pendekatan untuk keadaan operasi normal. Sedangkan simulasi *transient analysis* berdasarkan metode analisis dinamis dilakukan dengan menerapkan beberapa skenario gangguan terhadap sistem.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk melakukan analisis stabilitas tegangan dengan metode kurva Q-V (analisis statis) dan analisis dinamis pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd.

## **1.3 Batasan Masalah**

Pembahasan skripsi ini dibatasi pada analisis stabilitas tegangan sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. berdasarkan hasil simulasi aliran daya dengan metode kurva Q-V untuk analisis statis dan hasil simulasi *transient analysis* untuk analisis dinamis tanpa memperhatikan detail keseluruhan sistem proteksi pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd., kecuali penggunaan *under voltage relay* untuk skenario pelepasan beban dan *directional power relay* pada saluran transmisi tertentu.

## **1.4 Metodologi Penelitian**

Metodologi penelitian pada skripsi ini adalah dengan melakukan analisis statis dan dinamis terhadap sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. Analisis statis dilakukan menggunakan metode kurva Q-V terhadap hasil simulasi aliran daya

pada perangkat lunak ETAP 7.0.0, sedangkan simulasi dinamis dilakukan menggunakan hasil simulasi *transient analysis* dengan beberapa skenario gangguan besar.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab, diawali dengan Bab I yang menjelaskan tentang latar belakang, tujuan penulisan skripsi, batasan masalah yang diambil, metodologi penelitian yang dilakukan, dan sistematika penulisan. Pada Bab II dijelaskan tentang stabilitas tegangan secara detail dimana bab ini terdiri dari penjelasan tentang komponen-komponen dalam sistem tenaga listrik yang mempengaruhi stabilitas tegangan, *voltage collapse*, analisis stabilitas tegangan, dan upaya untuk mengatasi masalah stabilitas tegangan. Kemudian, pada Bab III dipaparkan tentang deskripsi sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. dan simulasi yang dilakukan dengan perangkat lunak ETAP 7.0.0, termasuk simulasi aliran daya dan simulasi *transient analysis*. Lalu Bab IV berisi hasil simulasi yang dilakukan pada Bab III dan analisis statis serta analisis dinamis terhadap hasil simulasi. Selanjutnya akan dipaparkan kesimpulan pada Bab V.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik**

Stabilitas Sistem Tenaga Listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kesetimbangan kondisi operasi setelah mengalami gangguan fisik [3]. Integritas sistem dipertahankan ketika keseluruhan sistem tenaga listrik tetap utuh tanpa pemutusan generator atau beban, kecuali diputuskan untuk mengisolasi dari elemen-elemen yang mengalami gangguan atau secara sengaja diputuskan untuk mempertahankan kontinuitas operasi sistem.

Sistem tenaga listrik adalah sistem yang beroperasi dengan perubahan beban, keluaran generator, topologi, dan parameter operasi lain yang berubah secara kontinyu. Gangguan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yakni gangguan kecil dan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Sistem harus dapat beroperasi dibawah setiap kondisi secara memuaskan dan sesuai dengan permintaan beban. Selain itu, sistem juga harus dapat bertahan terhadap beberapa gangguan besar dari dalam dan luar sistem, termasuk hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya sebuah pembangkit besar.

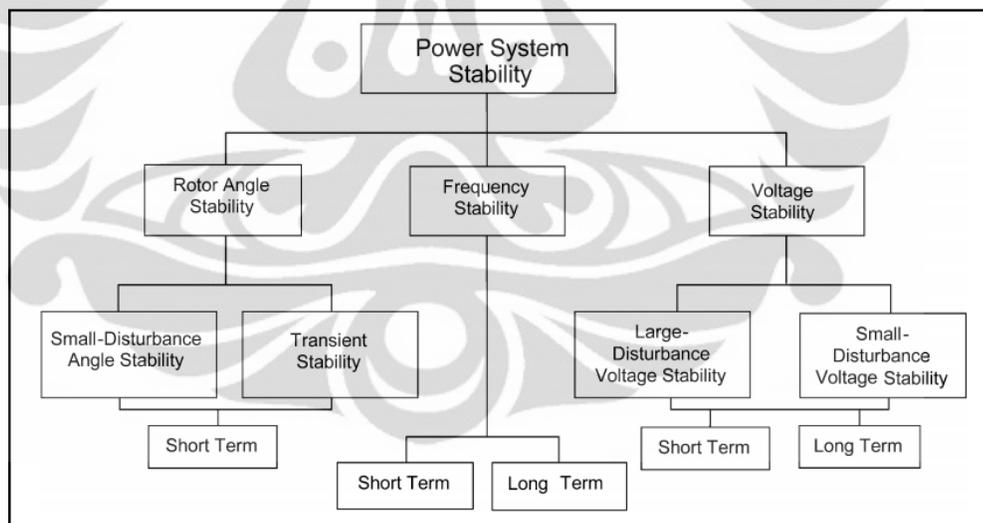
Mengikuti gangguan transien, sistem tenaga listrik yang stabil akan mencapai keadaan setimbang dengan seluruh sistem tetap utuh. Tindakan dari pengendali otomatis dan operator akan segera mengembalikan sistem ke keadaan normal. Sebaliknya, pada sistem yang tidak stabil, hal tersebut akan menyebabkan kondisi lepas kendali, contohnya penurunan secara progresif pada tegangan bus. Sebuah kondisi sistem yang tidak stabil dapat menimbulkan pemadaman dalam porsi yang besar pada sistem tenaga listrik.

Respons sistem tenaga listrik terhadap gangguan dapat mempengaruhi kondisi peralatan. Sebagai contoh, sebuah gangguan pada elemen yang kritis dapat menyebabkan variasi pada aliran daya, tegangan bus jaringan, dan kecepatan rotor mesin. Variasi tegangan akan mengaktifkan *exciter* pada generator, variasi beban akan mengaktifkan governor untuk menyesuaikan

kecepatan generator, serta variasi tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban sistem menjadi bervariasi bergantung pada karakteristik masing-masing. Lebih lanjut, divais yang digunakan untuk melindungi peralatan tertentu dapat memberikan respon pada variasi variabel sistem dan mempengaruhi unjuk kerja sistem tenaga listrik. Sehingga, ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik mungkin terjadi dalam bentuk yang berbeda bergantung pada topologi sistem, mode operasi, dan bentuk gangguan.

Stabilitas sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini [1]:

- Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- Divais, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.



Gambar 2.1 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik [3]

Gambar 2.1 menunjukkan sebuah kemungkinan klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, dan stabilitas tegangan.

Stabilitas sudut rotor dihubungkan dengan kemampuan mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam sebuah sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam

keadaan sinkron di bawah kondisi operasi setelah mengalami gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin sinkron pada sistem. Ketidakstabilan dapat menyebabkan terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kehilangan sinkronisasi dapat terjadi antara satu mesin dengan sistem, atau antara beberapa kelompok mesin, antara sinkronisasi yang dipertahankan dengan masing-masing kelompok setelah pemisahan satu sama lain. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu stabilitas gangguan kecil (keadaan tunak) dan stabilitas pada keadaan transien.

Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan tunak pada seluruh bus dalam sistem yang berada di bawah kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik.

Faktor utama penyebab ketidakstabilan tegangan biasanya adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika ketika daya aktif dan reaktif mengalir melalui reaktansi induktif yang pada jaringan transmisi. Hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengirim daya. Transfer daya akan semakin terbatas ketika beberapa generator mencapai batas kemampuan daya reaktifnya. Pemicu utama ketidakstabilan tegangan adalah beban. Dalam merespon sebuah gangguan, daya yang dikonsumsi beban dipulihkan oleh aksi dari regulator tegangan distribusi dan transformator on load *tap-changing*. Pemulihan beban meningkatkan tekanan pada jaringan tegangan tinggi menyebabkan lebih banyak pengurangan tegangan. Situasi tersebut menyebabkan terjadi ketidakstabilan tegangan ketika beban dinamis berusaha memulihkan konsumsi daya di luar kemampuan sistem transmisi dan pembangkit yang terhubung.

Sebagaimana pada stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

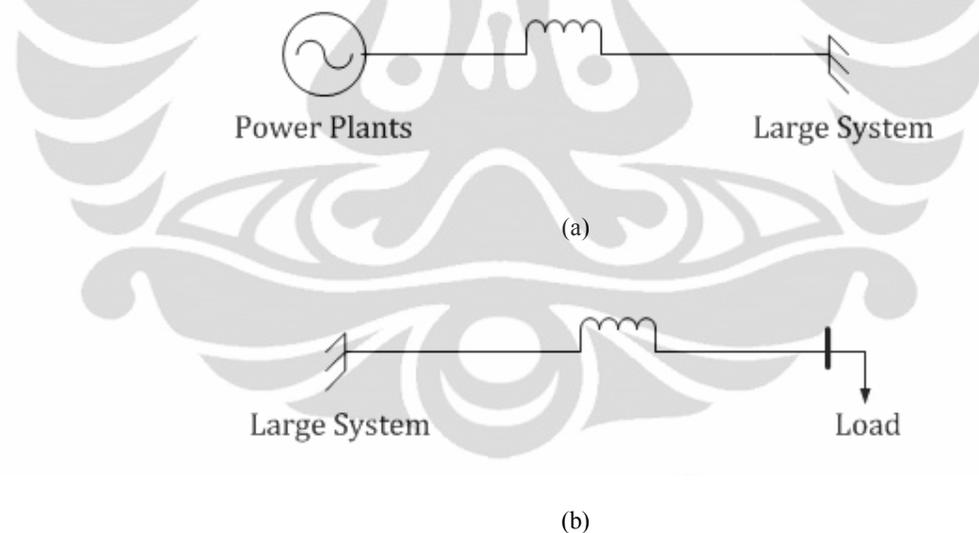
a. Stabilitas tegangan gangguan besar dikaitkan dengan kemampuan suatu sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan besar, seperti gangguan sistem, lepasnya pembangkitan, atau *circuit contingencies*. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik antara beban dan sistem, serta interaksi dari sistem proteksi dan kendali kontinu. Penentuan stabilitas gangguan besar membutuhkan pengujian unjuk kerja dinamis nonlinear suatu sistem selama periode waktu tertentu sehingga dapat menangkap interaksi beberapa divais seperti *on-load transformer tap changer* (OLTC) dan pembatas arus medan pada generator. Rentang waktu studinya dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, simulasi dinamis jangka panjang dibutuhkan untuk analisa.

b. Stabilitas tegangan gangguan kecil terkait berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan kecil seperti kenaikan beban sistem. Bentuk stabilitas ini ditentukan antara lain oleh karakteristik beban dan kendali kontinyu. Konsep ini berguna untuk menentukan bagaimana tegangan sistem akan merespon terhadap perubahan kecil pada sistem setiap saat. Proses dasar yang berkontribusi terhadap stabilitas tegangan gangguan kecil adalah keadaan stabil alam. Oleh sebab itu, analisis statis dapat digunakan secara efektif untuk menentukan batas stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan menguji kondisi sistem dalam cakupan luas, serta sejumlah besar skenario pasca gangguan. Kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan kecil adalah sebagai berikut, pada kondisi operasi untuk setiap bus dalam sistem, nilai tegangan bus meningkat saat injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Sebuah sistem dikatakan tidak stabil tegangannya jika untuk minimal satu bus pada sistem, nilai tegangan bus menurun ketika injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Dengan kata lain, sebuah sistem dikatakan stabil tegangannya jika sensitivitas V-Q adalah positif untuk seluruh bus, sedangkan dikatakan tidak stabil jika sensitivitas V-Q adalah negatif untuk minimal satu bus.

Rentang waktu untuk masalah stabilitas tegangan bervariasi dari beberapa detik hingga hitungan menit. Sehingga, stabilitas tegangan mungkin merupakan

fenomena jangka panjang atau jangka pendek. Ketidakstabilan tegangan tidak selalu muncul dalam bentuk murni. Sering ketidakstabilan sudut rotor dan ketidakstabilan tegangan berjalan beriringan. Adanya salah satu dapat menyebabkan munculnya yang lain dan perbedaannya tidak jelas. Akan tetapi, perbedaan antara stabilitas sudut rotor dan stabilitas tegangan penting untuk dipahami penyebab terjadinya masalah dalam rangka untuk membangun desain dan prosedur operasi yang sesuai.

Terdapat beberapa kasus dimana salah satu bentuk ketidakstabilan tersebut dominan. Berdasarkan [2], IEEE mendapatkan dua situasi ekstrim: (a) sebuah generator sinkron yang lokasinya jauh dihubungkan dengan saluran transmisi menuju suatu sistem yang besar (stabilitas sudut rotor murni, masalah sebuah mesin dengan bus yang tak terbatas) dan (b) sebuah generator sinkron atau sistem besar dihubungkan oleh saluran transmisi menuju beban asinkron (stabilitas tegangan murni). Gambar 3.2 menunjukkan ekstrimitas tersebut.



Gambar 2.2 Contoh Sederhana yang Menunjukkan Situasi Ekstrim [2]

(a) Stabilitas Sudut Rotor Murni, (b) Stabilitas Tegangan Murni

Stabilitas tegangan berkaitan dengan daerah beban dan karakteristik beban. Stabilitas sudut rotor berhubungan dengan pembangkit listrik kecil yang terintegrasi dengan sebuah sistem besar melalui saluran transmisi yang panjang. Singkatnya, secara mendasar, stabilitas tegangan merupakan stabilitas beban,

sedangkan stabilitas sudut rotor merupakan stabilitas generator. Sehingga apabila terjadi runtuh tegangan (*voltage collapse*) pada sebuah sistem transmisi yang jauh dari beban, hal itu merupakan ketidakstabilan sudut rotor. Jika runtuh tegangan terjadi pada daerah beban, hal tersebut sebagian besar disebabkan oleh masalah ketidakstabilan tegangan.

Stabilitas frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti beberapa gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi pelepasan/kehilangan beban.

Biasanya beberapa gangguan sistem menghasilkan pergeseran frekuensi, aliran daya, tegangan, dan variabel lainnya secara signifikan. Dengan demikian aksi dari proses, kendali, dan proteksi tidak dimodelkan dalam stabilitas transien konvensional atau studi stabilitas tegangan. Proses ini bisa sangat lambat atau hanya terpicu untuk kondisi sistem ekstrim, misalnya pemutusan proteksi volt/hertz generator. Dalam sistem tenaga listrik terinterkoneksi yang cukup besar, situasi jenis ini adalah yang paling umum berhubungan dengan sistem pulau (*islanding*). Pada kasus ini, stabilitas adalah sebuah pertanyaan ya atau tidak masing-masing pulau (*island*) akan mencapai keadaan setimbang operasi dengan kehilangan beban minimum yang dapat diterima. Hal tersebut ditentukan oleh keseluruhan respon dari pulau (*island*), dibuktikan dengan rata-rata frekuensi dibandingkan dengan gerak mesin relatif. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berhubungan dengan tidak memadainya respon peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan proteksi dan kendali, atau ketersediaan pembangkitan yang kurang.

## 2.2 Stabilitas Tegangan

Masalah stabilitas tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya runtuh tegangan. Gangguan yang menyebabkan runtuh tegangan dapat dipicu oleh beberapa hal, seperti naiknya beban atau gangguan besar yang muncul secara tiba-tiba. Masalah yang paling mendasar adalah lemahnya sistem tenaga listrik. Di

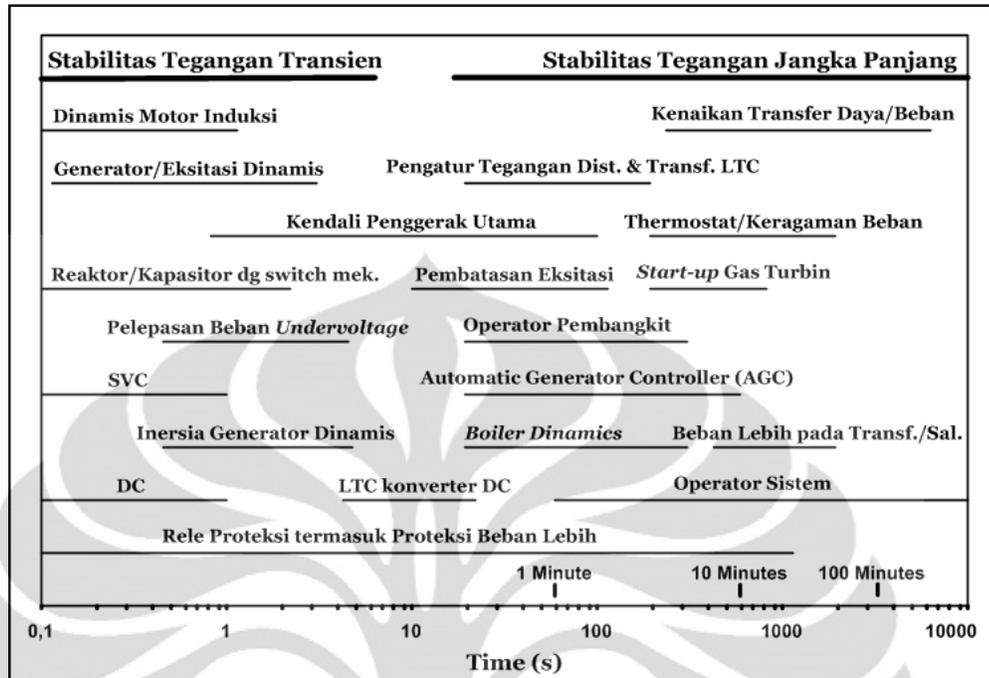
samping kekuatan jaringan transmisi dan kemampuan transfer daya, faktor-faktor yang berkontribusi dalam fenomena runtuh tegangan (*voltage collapse*), antara lain batas kendali tegangan / daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik kompensator daya reaktif, dan aksi dari divais kendali tegangan seperti transformator *on-load tap changer*.

Istilah-istilah yang terkait dengan stabilitas tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut:

- a. Stabilitas tegangan (*voltage stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*voltage collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah pada bagian penting dari sistem tenaga listrik [3].
- c. Keamanan Tegangan (*Voltage security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik, tidak hanya untuk beroperasi stabil, tetapi juga tetap stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) setelah terjadi gangguan atau perubahan keadaan sistem yang signifikan.

Ketidakstabilan tegangan dan proses runtuh tegangan dapat terjadi dalam selang waktu beberapa detik hingga beberapa menit. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa sejumlah komponen dan kendali sistem tenaga listrik memainkan peran dalam stabilitas tegangan. Karakteristik sistem dan gangguan akan menentukan fenomena yang penting bagi suatu sistem tenaga listrik.

Berdasarkan rentang waktu terjadinya, stabilitas tegangan dibagi menjadi stabilitas tegangan transien (*transient voltage stability*) dan stabilitas tegangan jangka panjang (*longer-term stability*) [2].



Gambar 2.3 Klasifikasi Stabilitas Tegangan [2]

Setiap komponen dalam sistem tenaga listrik memberikan pengaruh terhadap stabilitas tegangan sistem tersebut, termasuk sistem pembangkitan, sistem transmisi, karakteristik beban, dan kompensator daya reaktif.

### 2.2.1 Sistem Pembangkitan

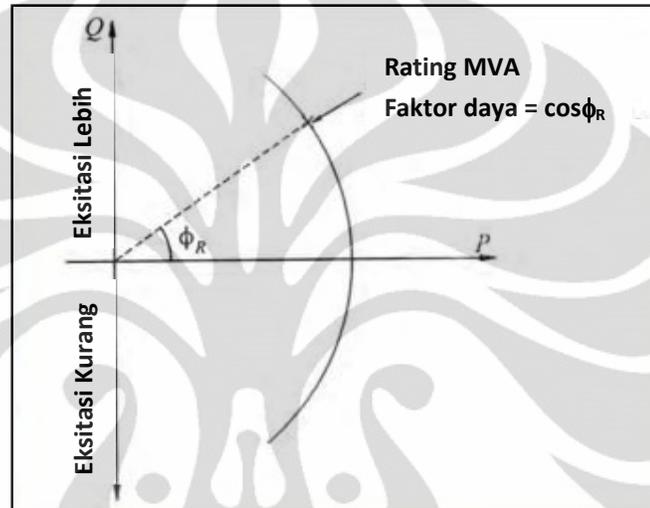
#### a. Kemampuan Daya Reaktif Generator

Kemampuan daya aktif generator dibatasi oleh kemampuan penggerak utama (*prime mover*) terhadap nilai rating MVA generator. Sedangkan kemampuan daya reaktif yang dihasilkan generator dibatasi oleh tiga parameter, yaitu batas arus medan (*field current limit*), batas arus jangkar (*armature current limit*), dan batas pemanasan wilayah ujung (*end region heating limit*).

Salah satu batasan dari rating generator adalah arus maksimum yang dapat dihantarkan oleh belitan jangkar tanpa melebihi batas pemanasan. Berdasarkan persamaan daya kompleks keluaran generator,

$$\begin{aligned}
 S &= P + jQ = \tilde{E}_t \tilde{I}_t^* \\
 &= |E_t| |I_t| (\cos \phi + j \sin \phi)
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

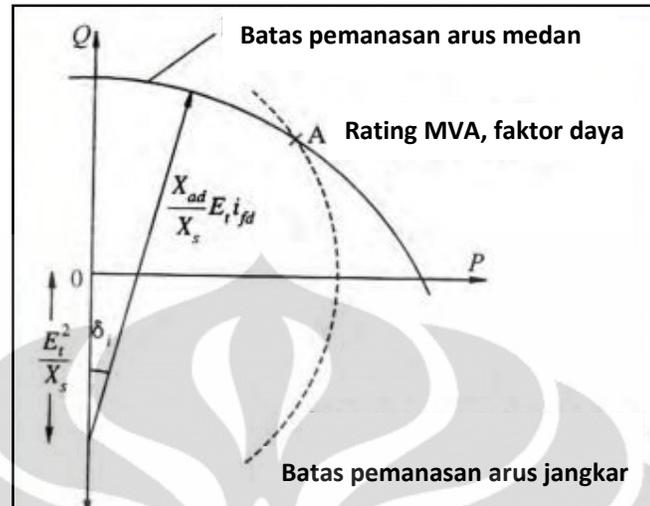
Keterangan:  $S$  = Daya Kompleks (VA)  
 $P$  = Daya Aktif (W)  
 $Q$  = Daya Reaktif (VAR)  
 $E_t$  = Tegangan Terminal Generator (V)  
 $I_t$  = Arus Terminal Generator (A)  
 $\phi$  = Sudut Faktor Daya



Gambar 2.4 Batas Panas Arus Jangkar [1]

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, batas arus jangkar pada bidang P-Q berupa lingkaran dengan pusat titik (0,0) dan jari-jari sebesar rating MVA generator.

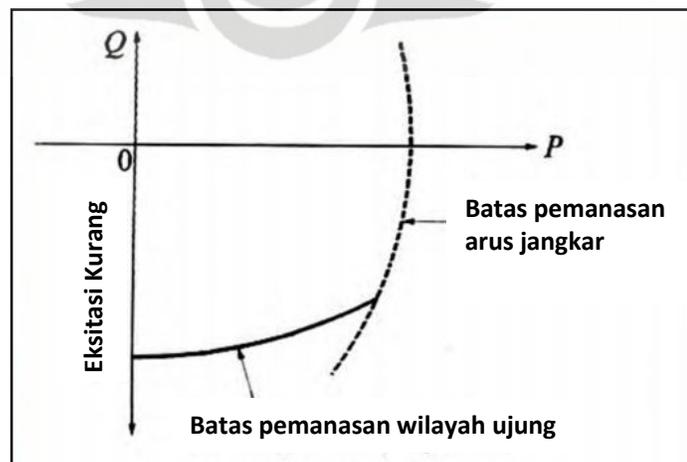
Selain batas pemanasan akibat arus jangkar, arus medan juga membatasi suplai daya reaktif yang dihasilkan generator. Panas yang muncul pada belitan rotor/medan diakibatkan oleh rugi-rugi daya yang besarnya berbanding lurus dengan kuadrat arus medan.



Gambar 2.5 Batas Panas Arus Medan [1]

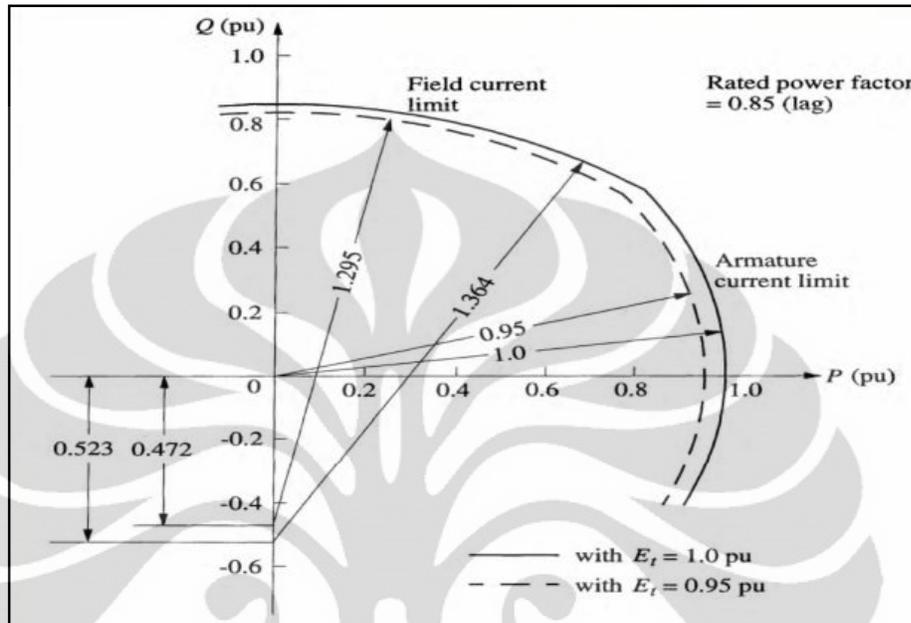
Hubungan antara daya aktif dan reaktif dengan nilai arus medan tertentu direpresentasikan dengan sebuah lingkaran yang berpusat di  $\left(\frac{E_t^2}{X_s}\right)$  pada sumbu-Q dan jari-jari  $\left(\frac{X_{ad}}{X_s} E_t I_{fd}\right)$ . Pengaruh rating arus medan maksimum terhadap kemampuan mesin dapat diilustrasikan pada bidang P-Q, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Umumnya, pada desain yang seimbang, batas panas untuk arus medan dan arus jangkar berpotongan di titik A dimana menggambarkan kapasitas MVA *nameplate* dan rating faktor daya.

Batas pemanasan pada wilayah ujung generator merupakan batas ketiga pada operasi mesin sinkron. Batas ini mempengaruhi kemampuan mesin pada kondisi eksitasi bawah (*under excited*).



Gambar 2.6 Batas Pemanasan pada Wilayah Ujung Generator [1]

Ketika digambarkan pada bidang P-Q, batas pemanasan akibat arus jangkar dan arus medan bergantung pada tegangan jangkar.



Gambar 2.7 Pengaruh dari Pengurangan Tegangan Jangkar terhadap Kurva Kemampuan Generator

[1]

#### b. Proteksi dan Kendali Generator

Kendali eksitasi dilakukan oleh *automatic voltage regulator* (AVR). Tegangan terminal generator diukur dan dibandingkan dengan nilai referensi yang diinginkan. Sinyal *error* mengendalikan keluaran *exciter* yang merupakan tegangan medan generator utama. Selama operasi pada keadaan tunak, tegangan terminal diatur oleh sistem kendali umpan balik berpenguatan tinggi. Umumnya kesalahan tegangan dari keadaan tanpa beban hingga beban penuh kurang lebih 0,5%. Di samping itu, juga terdapat perubahan tegangan terminal terkait dengan perubahan daya reaktif.

##### ▪ Proteksi dan Kendali Medan (*Field*) Generator

Selain berfungsi untuk mengatur tegangan terminal generator, AVR juga berfungsi untuk membatasi arus medan. Pada sebagian besar AVR terdapat pembatas eksitasi lebih (*overexcitation limiter*) atau pembatas eksitasi maksimum yang mendeteksi tegangan atau arus medan yang tinggi dan melalui regulator untuk mengembalikan eksitasi pada nilai awal setelah waktu tunda yang dapat

diatur. Pembatas eksitasi tidak selalu dapat melindungi generator, terutama kendali manual atau ketika terjadi kegagalan pada pengaturnya sendiri. Sehingga perlu ditambahkan proteksi eksitasi lebih (*overexcitation protection*). Divais ini memiliki karakteristik yang sesuai dengan kemampuan medan generator dan menyalakan alarm, serta mengembalikan kondisi eksitasi pada posisi awal dimana umumnya berhubungan dengan kapasitas generator. Divais tersebut juga dapat membuat pengatur tegangan menjadi *trip* ketika nilai eksitasi tidak dapat dikembalikan ke posisi awal.

- Proteksi dan Kendali Jangkar (*Armature*) Generator

Sebagian besar generator dilengkapi dengan *resistance temperature detectors* (RTD) yang tertanam pada belitan jangkar. RTD tersebut dapat juga dilengkapi dengan *time-overcurrent relay* yang dikoordinasikan dengan kemampuan arus lebih waktu singkat belitan jangkar generator. RTD dan relai arus lebih menyediakan sinyal alarm atau *trip*. Selain itu, relai jarak atau relai arus lebih sering digunakan sebagai proteksi cadangan sistem. Relai digerakkan oleh arus jangkar dan tegangan terminal, serta tidak terkoordinasi dengan kendali batas eksitasi. Relai ini berfungsi untuk mendeteksi kegagalan sistem transmisi, tetapi dapat beroperasi pada keadaan beban lebih dan tegangan terminal yang rendah. Operasi yang tidak sesuai pada relai dapat berkontribusi pada terjadinya runtuh tegangan. Untuk mempertahankan stabilitas tegangan, pengaturan relai harus sering ditinjau ulang.

### 2.2.2 Sistem Transmisi

Representasi reaktansi saluran transmisi, transformator, dan generator didominasi oleh komponen induktif. Hal ini menyebabkan adanya kesepakatan bahwa interkoneksi antara dua sumber adalah bersifat resistif dan induktif. Sedangkan kapasitansi paralel pada saluran transmisi tidak muncul secara eksplisit, melainkan pengaruhnya direpresentasikan dalam daya reaktif yang ditransmisikan (pengurangan induktansi terhadap kapasitansi).

- a. Rugi Daya Saluran Transmisi

Karena nilai reaktansi saluran transmisi lebih besar daripada nilai resistansinya, rugi daya transmisi akibat reaktansi lebih besar daripada rugi daya

transmisi akibat resistansi. Hal ini menyebabkan jatuh tegangan akibat reaktansi lebih besar sehingga tegangan pada sisi penerima lebih rendah daripada tegangan pada sisi pengirim.

Rugi daya saluran transmisi adalah sebagai berikut:

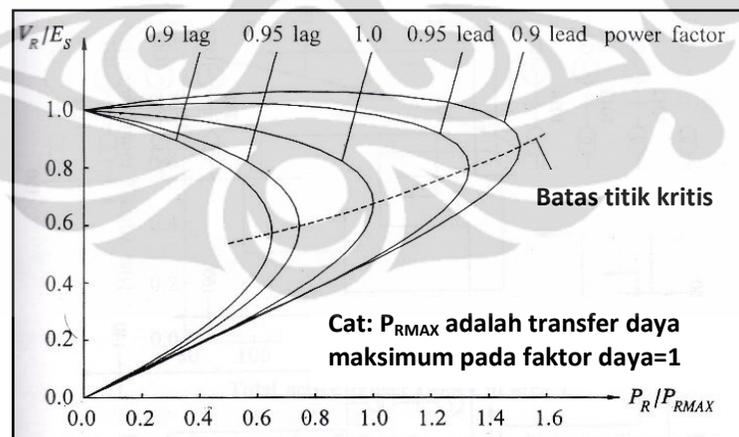
$$P_{loss} = RI^2 = R \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \quad (2.2)$$

$$Q_{loss} = XI^2 = X \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \quad (2.3)$$

Dari persamaan di atas, kenaikan daya reaktif yang ditransmisikan menyebabkan kenaikan rugi daya aktif maupun rugi daya reaktif. Sehingga untuk meningkatkan efisiensi transmisi daya maka transmisi daya reaktif harus dikurangi dan tegangan harus dijaga tinggi.

#### b. Karakteristik Sistem Transmisi

Seperti pada sistem pembangkitan, hubungan antara V dan P pada sistem transmisi juga dapat direpresentasikan dengan lebih sederhana dalam kurva V-P dimana faktor daya beban bervariasi. Titik operasi kritis yang digambarkan dalam garis putus-putus merupakan batas stabilitas dimana hanya titik-titik operasi di atas titik kritis yang merepresentasikan kondisi operasi yang baik (stabil).



Gambar 2.8 Kurva V-P pada Sistem [1]

#### c. Transformator *On Load Tap Changer* (OLTC)

Transformator OLTC berfungsi untuk mengatur tegangan di sisi penerima (beban). Sebuah rele tegangan memantau tegangan di sisi beban. Jika tegangan berada di luar *deadband* (dengan tipikal *bandwidth* 2 Volt dari basis 120 Volt atau

$\pm 0,83\%$ ), sebuah rele timer akan bekerja. Jika rele selesai bekerja (setelah puluhan detik), mekanisme perubahan tap (*tap changing mechanism*) akan beroperasi dan pemindahan tap akan terus berlangsung hingga tegangan mencapai interval *deadband* atau sampai maksimum/minimum tap dicapai. Setiap tegangan mencapai interval *deadband*, rele tegangan dan timer diatur ulang (*reset*) secara otomatis. Pada keadaan *voltage collapse*, *tap changer* pada transformator atau pengatur tegangan dapat *reset* beberapa kali untuk memperlambat proses *voltage collapse*.

Transformator OLTC biasanya mempunyai  $\pm 10\%$  cakupan tap yang terdiri dari 32 step atau masing-masing step sebesar  $3/8\%$ . Waktu tunda sebelum perubahan tegangan (*tapping*) dapat diatur biasanya dalam interval 10 – 120 detik. Tipikalnya 30 atau 60 detik [2].

### 2.2.3 Beban

Beban pada sistem tenaga listrik sangat banyak dan bervariasi jenisnya. Untuk itu digunakan suatu pemodelan beban yang mewakili karakteristik beban secara keseluruhan. Secara umum pemodelan beban dibagi menjadi dua, yaitu model beban statis dan model beban dinamis.

#### a. Beban Statis

Karakteristik beban menunjukkan hubungan antara besar daya yang diserap beban dengan tegangan, dalam hal ini frekuensi diabaikan. Karakteristik beban yang bergantung dengan tegangan dapat direpresentasikan dalam dua model, yaitu model eksponensial dan model polinomial.

#### b. Model Dinamis

Respon dari sebagian beban gabungan (*composite load*) mengakibatkan perubahan tegangan yang cepat dan mencapai keadaan tunak dengan sangat cepat pula, dalam hal ini frekuensi diabaikan. Representasi model dinamis diperlukan untuk keperluan beberapa studi, termasuk studi osilasi antar area, stabilitas tegangan, dan stabilitas jangka panjang. Beberapa komponen beban yang aspek dinamisnya perlu diperhatikan, antara lain [1]:

- Pemadaman lampu-lampu *discharge* di bawah tegangan tertentu dan penyalaan kembali ketika tegangan membaik. Beberapa jenis *discharge*

lamp, yaitu gas merkuri, gas sodium, gas natrium, dan lampu fluorescent akan padam pada rentang tegangan 0,7 hingga 0,8 pu dan menyala kembali setelah 1 atau 2 detik sejak tegangan pulih kembali.

- Rele pengamanan operasi, seperti rele arus lebih dan rele thermal. Beberapa motor pada industri-industri memiliki starter dengan kontaktor secara elektromagnetik. Divais ini mulai terbuka pada tegangan 0,55 hingga 0,75 pu.
- Kendali termostatik beban seperti pemanas air, pemanas atau pendingin ruangan, dan lemari pendingin.

Selain komponen yang disebutkan, permodelan dinamis motor adalah yang paling penting karena motor mengkonsumsi sebagian besar dari energi total yang disuplai oleh sistem tenaga listrik [1].

Keadaan motor induksi menjadi kritis ketika terjadi penurunan tegangan atau tegangan kedip di bawah 0,9 pu. Pada tegangan konstan antara 0,7 hingga 0,9 pu, motor induksi akan kehilangan kecepatan dan menarik daya reaktif. [2] Hilangnya kecepatan atau penghentian motor dapat mempengaruhi motor lainnya untuk melakukan hal yang sama.

#### 2.2.4 Kompensator Daya Reaktif

Kompensator daya reaktif biasanya ditambahkan untuk menyuplai atau menyerap daya reaktif sehingga kendali keseimbangan daya reaktif sesuai dengan yang diinginkan. Beberapa jenis kompensator daya reaktif yaitu: kapasitor paralel, reaktor paralel, kapasitor seri, dan *static var compensator* (SVC).

Kapasitor dan reaktor paralel, serta kapasitor seri menyediakan kompensasi pasif. Ketiga jenis kompensator tersebut dihubungkan secara permanen atau *switched* pada sistem transmisi atau distribusi dan memberikan kontribusi kendali tegangan dengan memodifikasi karakteristik jaringan. Sedangkan SVC menyediakan kompensasi pasif dimana daya reaktif disuplai atau diserap secara otomatis disesuaikan sehingga dapat menjaga tegangan pada bus yang terhubung dengannya. Sama seperti pada unit pembangkitan, SVC menghasilkan nilai tegangan tertentu pada sistem.

#### a. Kapasitor Paralel

Digunakan untuk menyuplai daya reaktif dan menaikkan tegangan lokal. Kapasitor paralel digunakan secara luas dalam berbagai ukuran. Kelebihannya adalah dalam hal fleksibilitas dalam pemasangan dan operasi, serta harganya yang murah. Kapasitor paralel juga berkontribusi terhadap transmisi dan distribusi daya. Sedangkan kelemahannya adalah daya reaktif yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat tegangan. Konsekuensinya adalah keluaran daya reaktif berkurang pada tegangan rendah. Padahal saat itu suplai daya reaktif sangat dibutuhkan. Di samping itu, kecepatan *switched* kapasitor secara mekanik agak lambat untuk mencegah terhentinya motor induksi.

Kapasitor paralel diaplikasikan pada sistem distribusi maupun sistem transmisi. Pada sistem distribusi, penambahan kapasitor paralel digunakan secara luas untuk perbaikan faktor daya dan kendali tegangan pada penyulang. Biasanya dilakukan pensaklaran (*switched*) secara otomatis dengan pewaktuan atau dengan rele dengan deteksi tegangan atau arus. Tujuan koreksi faktor daya adalah untuk menyediakan suplai daya reaktif yang dekat dengan titik konsumsi daripada menyuplainya dari sumber yang jauh. Sedangkan dalam kendali tegangan pada *feeder*, kapasitor dipasang pada lokasi yang sesuai sepanjang *feeder* untuk memastikan bahwa tegangan pada titik tersebut tetap berada dalam batas maksimum dan minimum seiring berubahnya beban.

Pada sistem transmisi, kapasitor paralel digunakan dengan tujuan untuk mengkompensasi rugi-rugi  $XI^2$  pada sistem transmisi dan untuk memastikan level tegangan masih dalam batas yang diperbolehkan saat keadaan pembebanan yang besar. Kapasitor bank dengan ukuran yang sesuai dapat dihubungkan secara langsung dengan bus tegangan tinggi atau pada belitan ketiga transformator utama.

#### b. Kapasitor Seri

Kapasitor ini dihubungkan secara seri dengan konduktor saluran untuk mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran. Kompensasi ini meningkatkan daya yang dapat ditransmisikan dan mengurangi rugi-rugi daya reaktif ( $XI^2$ ). Daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor seri meningkat seiring peningkatan transfer daya. Kapasitor seri tidak hanya mengurangi voltage drop pada kondisi tunak,

melainkan juga merespon hampir seluruh perubahan arus beban secara langsung (instan). Selain itu, kelebihan kapasitor seri adalah efektivitasnya dalam menyelesaikan masalah *light-flicker* dengan mengurangi impedansi antara sumber tenaga listrik yang besar dan beban yang fluktuatif, serta pengaturan sendiri (*self regulation*). Seperti pada kapasitor paralel, kapasitor seri juga dapat dipasang pada sistem distribusi dan transmisi [3].

Beberapa masalah yang mungkin timbul dalam penggunaan kapasitor seri, antara lain:

- Eksitasi diri pada motor sinkron dan motor induksi pada saat *starting*. Motor bisa terkunci pada kecepatan sinkron (subsinkron) terkait dengan kondisi resonansi. Penyelesaian yang paling sering dilakukan adalah dengan menambahkan resistansi yang sesuai secara paralel dengan kapasitor seri.
- Feroresonansi antara transformator dan kapasitor seri menghasilkan kelebihan tegangan harmonik. Hal ini mungkin terjadi ketika memberikan suplai daya pada transformator yang tidak berbeban atau saat tiba-tiba melepas beban.
- Dapat merusak motor sinkron (juga motor induksi dalam beberapa kasus) pada saat bebannya ringan akibat tingginya rasio R/X pada penyulang.

Karena masalah-masalah tersebut dan sulitnya proteksi kapasitor seri dari arus gangguan sistem, kapasitor seri jarang digunakan.

#### c. *Static VAr Compensator (SVC)*

SVC didesain untuk mengatasi keterbatasan *switched* secara mekanik pada kapasitor dan reaktor paralel. SVC terdiri dari static var generator (SVG) atau divais penyerap dan divais kendali yang sesuai. Kelebihan yang dimiliki SVC antara lain: cepat, pengaturan tegangan yang tepat dan tidak terbatas, kebebasan transien yang besar, serta *switching* kapasitor. Ketika sudah mencapai batas maksimumnya, maka SVC menjadi kapasitor paralel biasa.

Jenis-jenis SVC yaitu: saturated reactor (SR), thyristor-controlled reactor (TCR), thyristor-switched capacitor (TSC), thyristor-switched reactor (TSR), thyristor-controlled transformer (TCT), dan self- or line-commutated converter (SCC/LCC). Sejumlah konfigurasi SVC yang berbeda merupakan kombinasi yang

terdiri dari jenis dasar SVC dan kapasitor bank tetap (tanpa *switched*) yang telah digunakan secara praktis untuk kompensasi sistem transmisi.

### 2.3 *Voltage Collapse*

Terdapat sejumlah insiden runtuh tegangan di seluruh dunia. Berdasarkan insiden-insiden tersebut, runtuh tegangan dapat dikarakteristikkan sebagai berikut [1]:

a. Dapat dipicu oleh beberapa penyebab, antara lain: perubahan kecil pada sistem secara bertahap, seperti kenaikan beban secara alami tanpa diikuti oleh kemampuan suplai generator atau gangguan besar secara tiba-tiba, misalnya hubung singkat dan kehilangan unit pembangkitan atau saluran dengan pembebanan yang besar.

b. Ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif beban. Biasanya runtuh tegangan terjadi pada sistem dengan kondisi saluran yang pembebanannya besar. Ketika transportasi daya reaktif dari area terdekat susah dilakukan, sedikit kenaikan permintaan beban akan daya reaktif dapat mengakibatkan runtuh tegangan.

c. Merupakan penurunan tegangan secara perlahan dan hasil proses akumulasi yang melibatkan aksi dan interaksi dari banyak divais, sistem kendali, dan sistem proteksi. Jangka waktu terjadinya *collapse* dalam sejumlah kasus adalah dalam satuan menit. Tetapi, dalam beberapa situasi, durasi runtuh tegangan dinamik bisa lebih singkat, yakni dalam hitungan detik. Sebagaimana telah didiskusikan pada Bagian 2.2 (halaman 9-11), berdasarkan rentang waktu terjadinya, stabilitas tegangan diklasifikasikan menjadi rentang waktu jangka panjang dan transien.

d. Dipengaruhi oleh kondisi dan karakteristik sistem. Ketidakstabilan tegangan juga dapat menyebabkan runtuh tegangan. Faktor-faktor yang memiliki pengaruh besar terhadap ketidakstabilan tegangan, antara lain:

- Jarak yang jauh antara pembangkitan dan beban
- Aksi OLTC selama kondisi tegangan rendah
- Karakteristik beban yang tidak baik
- Koordinasi yang buruk antara sejumlah sistem kendali dan sistem proteksi

e. Dapat diperburuk oleh penggunaan kompensasi kapasitor paralel secara berlebihan.

## 2.4 Analisis Stabilitas Tegangan

### 2.4.1 Analisis Statis

Analisis statis (pada keadaan tunak) biasanya digunakan pada masalah ketidakstabilan tegangan yang disebabkan oleh gangguan-gangguan kecil, seperti kenaikan beban. Metode studi utama yang digunakan untuk analisis statis adalah simulasi aliran daya. Metode ini terbagi menjadi dua, yakni: kurva P-V dan kurva Q-V. Kedua metode tersebut dapat menentukan batas pembebanan pada keadaan tunak yang terkait dengan stabilitas tegangan. Dengan mengetahui kurva P-V maka kurva Q-V dapat dibuat dengan mengubah nilai P menjadi nilai Q dengan faktor daya tertentu, begitu juga sebaliknya.

#### a. Kurva P-V

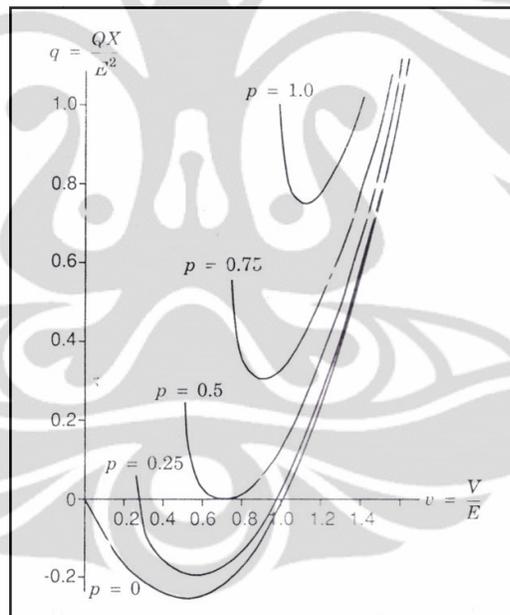
Kurva P-V digunakan untuk analisis konseptual stabilitas tegangan dan studi sistem radial. Metode ini juga digunakan pada jaringan melingkar (*ring*) dimana P adalah total beban pada sebuah area dan V adalah tegangan pada bus yang kritis atau representatif. P dapat juga berupa daya yang dikirim melalui saluran transmisi. Tegangan pada beberapa bus dapat digambar. Kelebihan kurva P-V lainnya adalah dapat digunakan untuk analisis karakteristik beban sebagai fungsi dari tegangan. Sebagai contoh sebuah beban resistif murni dapat digambarkan dengan persamaan  $P_{load} = V^2/R$ . Sedangkan untuk beban dengan daya konstan (tidak bergantung pada tegangan), kurva P-V berupa garis lurus vertikal. Di sisi lain, penggunaan kurva P-V juga memiliki kelemahan, yakni simulasi aliran daya akan divergen mendekati puncak atau titik daya maksimum kurva. Hal ini menyebabkan setengah bagian kurva tidak dapat digambarkan.

#### b. Kurva Q-V

Untuk sistem tenaga listrik yang besar, kurva Q-V didapatkan dengan beberapa kali simulasi aliran daya. Kurva V-Q menggambarkan tegangan pada bus yang diuji atau bus yang kritis terhadap daya reaktif pada bus yang sama. Kurva Q-V dibuat dengan menentukan beberapa nilai daya reaktif pada bus dan disimulasikan untuk melihat nilai tegangan bus untuk setiap nilai Q yang berbeda.

Keadaan operasi normal dianggap sebagai titik daya reaktif nol. Beberapa kelebihan dari analisis dengan kurva Q-V [2], antara lain:

- Keamanan tegangan sangat berhubungan dengan daya reaktif dan kurva Q-V dapat memberikan informasi batas daya reaktif pada bus yang diuji. Batas daya reaktif adalah jarak nilai VAR dari titik operasi hingga titik minimum kurva. Bus yang diuji dapat merepresentasikan semua bus dalam sebuah area kendali tegangan (sebuah area dimana nilai tegangannya berubah secara koheren).
- Kurva Q-V dapat dibuat pada titik-titik sepanjang kurva P-V untuk menguji kekuatan (*robustness*) sistem.
- Kemiringan (gradien) kurva Q-V mengindikasikan kekakuan (*stiffness*) sistem.



Gambar 2.9 Contoh Kurva Q-V yang Dinormalisasi

### 2.4.2 Analisis Dinamik

Analisis dinamik biasanya dilakukan dengan memberikan gangguan-gangguan besar pada sistem, termasuk lepasnya generator dan gangguan tiga fasa pada saluran transmisi. Analisis stabilitas tegangan gangguan besar pada sistem dapat dilakukan menggunakan simulasi dengan domain waktu [1]. Sistem yang diuji adalah sistem yang beroperasi pada keadaan normal dengan beberapa

gangguan besar untuk analisis beberapa aspek terkait dengan stabilitas tegangan, termasuk tegangan bus beban dan generator, arus eksitasi, serta daya reaktif yang dihasilkan generator.

## 2.5 Upaya untuk Mengatasi Masalah Stabilitas Tegangan

Beberapa metode dapat digunakan untuk mengurangi masalah stabilitas tegangan [4], antara lain:

- a. Pembangkit yang harus beroperasi.

Mengoperasikan generator cadangan (*back up supply*) untuk menyediakan dukungan tegangan selama keadaan darurat atau ketika saluran baru atau transformator terlambat beroperasi.

- b. Kapasitor Seri

Penggunaan kapasitor seri bertujuan untuk seolah-olah memperpendek saluran listrik yang panjang yang berarti mengurangi rugi daya reaktif. Selain itu, saluran listrik tersebut dapat mengirim daya reaktif yang lebih banyak menuju daerah yang kekurangan suplai daya reaktif.

- c. Kapasitor Paralel

Walaupun penggunaan kapasitor paralel yang banyak dapat menjadi bagian dari masalah stabilitas tegangan, terkadang kapasitor tambahan juga dapat menyelesaikan masalah dengan menggantikan fungsi cadangan daya reaktif berputar pada generator. Pada umumnya, hampir seluruh kebutuhan daya reaktif disuplai secara lokal, sedangkan generator hanya menyuplai daya aktif.

- d. Kompensator Statis (SVC dan STATCOM)

Kompensator statis, pasangan kondenser sinkron berdasarkan elektronika daya, efektif dalam mengendalikan tegangan dan mencegah *voltage collapse*, tetapi memiliki banyak keterbatasan yang harus diketahui. *Voltage collapse* yang terjadi pada sistem bergantung pada kompensator statis ketika sebuah gangguan yang melebihi kriteria perencanaan menyebabkan kompensator mencapai batasnya.

- e. Operasi pada Tegangan yang Lebih Tinggi

Operasi pada tegangan yang lebih tinggi tidak meningkatkan cadangan daya reaktif, tetapi menurunkan permintaan daya reaktif. Sehingga dapat

mempertahankan generator jauh dari batas daya reaktifnya dan hal tersebut membantu operator untuk menjaga kendali tegangan. Perbandingan dari kurva Q-V pada sisi penerima untuk dua sisi pengirim menunjukkan nilai tegangan yang lebih besar.

f. Pelepasan Beban *Undervoltage*

Sedikit pengurangan beban, walaupun sebesar 5% hingga 10% dapat membuat perbedaan yang signifikan antara *collapse* atau bertahan. Saat ini, pelepasan beban manual digunakan untuk tujuan ini (beberapa *utility* menggunakan pengurangan tegangan distribusi melalui SCADA), walaupun mungkin kurang efektif karena terlalu lambat jika terdapat kekurangan daya reaktif yang cukup besar. *Undervoltage* rele *invers time* jarang digunakan, tetapi dapat menjadi sangat efektif. Pada sebuah jaringan radial, pelepasan beban didasarkan pada tegangan sisi primer. Pada masalah stabilitas keadaan tunak, pelepasan beban pada sisi penerima akan lebih efektif walaupun mungkin tegangan paling rendah berada di dekat pusat beban.

g. Faktor Daya Generator yang Lebih Rendah

Ketika pembangkitan baru cukup dekat dengan daerah yang mungkin membutuhkan cadangan daya reaktif yang besar, faktor daya generator sebesar 0,8 atau 0,85 terkadang mungkin lebih sesuai. Akan tetapi, kapasitor dengan sebuah faktor daya generator yang tinggi dimana generator tersebut memiliki kemampuan beban lebih daya reaktif akan lebih fleksibel dan ekonomis.

h. Menggunakan Kemampuan Beban Lebih Daya Reaktif Generator

Generator harus digunakan seefektif mungkin. Kemampuan beban lebih dari generator dan eksiter dapat digunakan untuk menunda *voltage collapse* hingga operator dapat mengubah pengiriman atau membatasi beban ketika terjadi beban lebih (*overload*). Akan lebih baik jika kemampuan beban lebih didefinisikan lebih lanjut, operator dilatih untuk menggunakannya, dan divais proteksi diatur agar tidak mencegah penggunaannya.

## BAB III

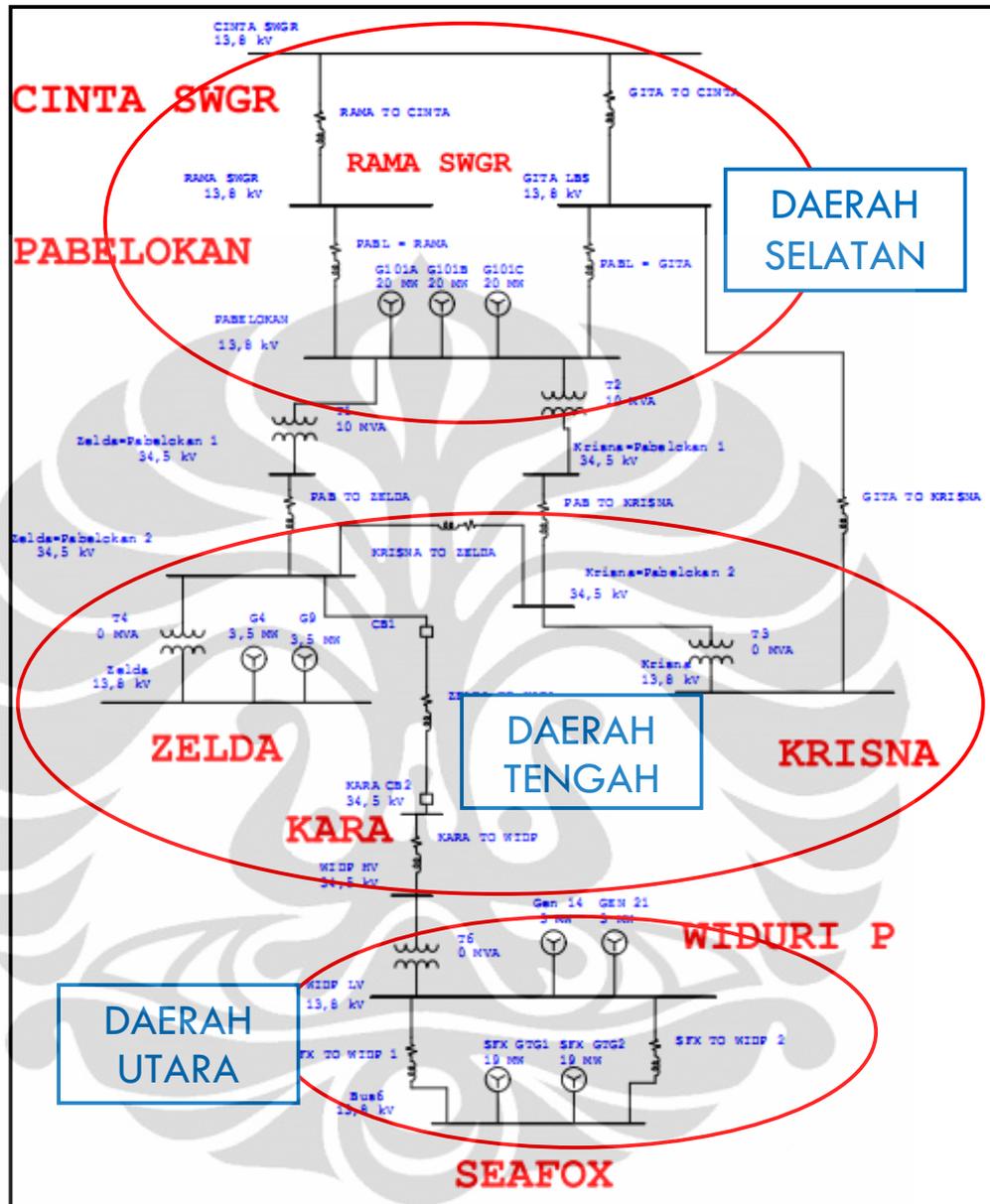
### DESKRIPSI SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES LTD.

#### 3.1 Pembagian Daerah Operasi CNOOC SES Ltd.

Daerah operasi di CNOOC SES Ltd. terbagi menjadi tiga, yaitu daerah Selatan (*South*), daerah Tengah (*Central*), dan daerah Utara (*North*) dengan beban total sekitar 95 MW dan kemampuan pembangkitan maksimum sebesar 111 MW. Terdapat 9 buah generator yang tersebar di seluruh daerah operasi dan saling terinterkoneksi. Ratusan sumur minyak (*wells*) juga tersebar dari daerah Selatan hingga daerah Utara.

Tabel 3.1 Data Generator pada Keadaan Operasi Normal dari Load Flow ETAP 7.0.0

Daerah Operasi	Platform/Daerah	Pembangkitan				Beban	
		Jumlah	Kapasitas (MW)	Total (MW)	Total (MVAR)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
<b>SELATAN</b> ( <i>South</i> )	Pabelokan	3	20	60	41,88	32	22
<b>TENGAH</b> ( <i>Central</i> )	Zelda	2	3,5	7	4,89	11	15
<b>UTARA</b> ( <i>North</i> )	Widuri P	2	3	6	4,19	52	38
	Seafox	2	19	38	26,52		
<b>total</b>				<b>111</b>	<b>77,48</b>	<b>95</b>	<b>75</b>



Gambar 3.1 Pembagian Daerah Operasi CNOOC SES Ltd.

a. Daerah Selatan (*South*)

Berpusat di Pabelokan, daerah Selatan disuplai oleh dua generator GE berkapasitas 20 MW dan satu generator Alsthom berkapasitas 20 MW dengan pengaturan sebagai generator swing dengan mode governor *isochronous*. Pada keadaan normal, ketiga generator tersebut masing-masing menyuplai daya sekitar 14,4 MW menuju *gas plant* dan *utility* di Pabelokan, beberapa platform di daerah Selatan, serta dikirim ke daerah Tengah dan Utara. Platform yang terdapat di

daerah Selatan, antara lain: Cinta, East Rama, Gita, Kitty, Lita, Nora, *North Wanda*, Rama, Retno, Selatan, Sundari, dan *South West Wanda*.

b. Daerah Tengah (*Central*)

Daerah Tengah terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu platform Zelda dan platform Krisna. Kedua platform tersebut mendapat suplai langsung dari Pabelokan. Selain mendapat suplai dari Selatan, daerah Tengah juga memiliki generator berkapasitas 2 X 3,5 MW di daerah Zelda dengan pengaturan governor *droop*. Platform-platform lain selain Zelda dan Krisna yang terdapat di daerah Tengah, antara lain: Atti, Banuwati, Farida, Karmila, Kartini, Risma, Sundari, Teresia, Titi, Yani, dan Yvone. Terdapat saluran transmisi langsung dari Farida B menuju Farida C yang kemudian membentuk jaringan *ring* antara daerah operasi Tengah dan daerah operasi Selatan.

c. Daerah Utara (*North*)

Daerah Utara mendapat suplai langsung dari Pabelokan (daerah Selatan) melalui Karmila dan masuk ke dalam busbar pada *substation* platform Widuri Proses (WIDP). Pada keadaan operasi normal, suplai daya mengalir dari Pabelokan menuju daerah Utara melalui Karmila sebesar 7-9 MW. Di daerah Utara juga terdapat generator GE dan Alsthom, masing-masing berkapasitas 19 MW di Platform Seafox dan generator Solar 2X3 MW di Platform Widuri Proses (WIDP) yang diatur pada mode governor *droop*. Daerah Utara adalah daerah operasi dengan presentase beban terbesar karena platform dan sumur minyak terbanyak terdapat disana. Platform yang terdapat di daerah Utara, antara lain: Intan, North East Intan, Widuri, Aida, Indri, Windri, Lidya, Chesy, Vita, dan Aryani.

### 3.2 Simulasi Aliran Daya

Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP) 7.0.0. Untuk simulasi aliran daya digunakan metode iterasi Newton-Rhapson dengan maksimum 100 iterasi dan ketelitian sebesar 0,0001.

### 3.2.1 Sistem Pembangkitan

Generator-generator yang terdapat dalam sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. diatur sebagai berikut:

Tabel 3.2 Pengaturan Generator pada Simulasi

No	ID Generator	Mode Operasi	Kapasitas (MW)	ID Bus Controlled	Q min (MVAR)	Q maks (MVAR)	Tipe Governor	Mode Governor	Tipe Exciter
1	PABL-G101A	Swing	20	PABL13,8-B	-12,5	19	GGOV3	Isoch	ST4B
2	PABL-G101B	Swing	20	PABL13,8-A	-12,5	19	GGOV3	Isoch	ST4B
3	PABL-G101C	Swing	20	PABL13,8-A	-12,5	19	GGOV3	Isoch	ST4B
4	G4	PF Control	3,5	ZELP13	-2,969	4,957	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3
5	G9	PF Control	3,5	ZELP13	-2,969	4,957	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3
6	Gen14	PF Control	3	WIDP11B-10	-2,669	4,471	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3
7	GEN21	PF Control	3	WIDP11A-3	-2,669	4,471	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3
8	SFX GTG1	PF Control	19	SFX11A	-12,5	19	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3
9	SFX GTG2	PF Control	19	SFX11B	-12,5	19	GGOV3	<i>Droop</i>	AC3

Generator PABL-G101A hingga PABL-G101C diatur pada mode operasi swing dengan tipe penguat arus medan (*exciter*) ST4B dan mode governor *Isochronous*, sedangkan generator lainnya diatur pada mode operasi PF control, tipe *exciter* AC3, dan mode governor *droop*. Untuk seluruh generator, tipe governor yang digunakan sama, yaitu tipe GGOV. Nilai Q minimum dan Q maksimum ditentukan dari kurva kemampuan daya generator.

#### 3.2.1.1 Mode Operasi Generator

Pada perangkat lunak ETAP, mode operasi generator dibedakan menjadi 4, yaitu: Swing, Voltage Control, MVAR Control, dan PF Control.

##### a. Swing

Untuk studi aliran daya, sebuah generator dengan mode swing akan berusaha memenuhi kekurangan aliran daya pada sistem dimana nilai dan sudut tegangan terminal generator akan dijaga tetap berada pada nilai operasi tertentu. Salah satu dari mesin yang beroperasi pada mode swing akan dipilih sebagai mesin referensi untuk keseluruhan sistem. Sehingga harus ada minimal satu mesin swing yang terhubung dengan sistem pada diagram satu garis (*single line diagram*). Selain itu, tegangan rating generator swing digunakan sebagai basis tegangan pada bus yang terhubung dengan generator tersebut. Untuk studi analisis

transien, generator swing menjadi mesin referensi untuk keseluruhan sistem, misalnya jika sudut dari sumber tegangan internal generator diset 0, maka sudut tegangan seluruh mesin sinkron pada sistem akan menjadi relatif terhadap mesin referensi ini.

b. Voltage Control

Generator voltage control merupakan generator mode *droop* (nilai MW konstan) dengan sebuah *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang mengatur *exciter* untuk beroperasi pada tegangan konstan. Selama studi aliran daya, jika MVAR generator yang terhitung berada di luar batas kemampuan MVAR generator, maka nilai MVAR akan diset sama dengan batasnya dan mode generator akan berubah menjadi MVAR Control.

c. MVAR Control

Dengan MVAR Control, generator diset dengan nilai MW dan MVAR yang konstan. Generator MVAR Control berarti generator mode *droop* (nilai MW konstan) dengan pengaturan *exciter* yang juga konstan (tanpa aksi AVR).

d. PF Control

Pada mode ini, governor beroperasi pada mode *droop* sehingga keluaran MW generator sama dengan pengaturan MW. Sebaliknya, *exciter* AVR menyesuaikan pengaturan faktor daya (Power Factor = PF). Intinya adalah, mode ini menjaga agar keluaran generator memiliki daya listrik (MW) dan PF yang konstan.

### 3.2.1.2 Kemampuan Daya Reaktif

Kemampuan daya reaktif generator bergantung pada kurva kemampuan generator yang tertera pada spesifikasi generator (dapat dilihat pada bagian Lampiran).

### 3.2.1.3 Governor

Generator PABL-G101A, PABL-G101B, dan PABL-G101C diatur pada mode *Isochronous*, sedangkan generator SFX GTG1, SFX GTG2, G4, G9, Gen14, dan GEN21 diatur pada mode *droop*. Pada mode *isochronous*, *set point* putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya listrik sistem pada saat itu (*real*

*time*). Kemudian melalui internal proses di dalam governor (sesuai dengan kontrol logika dari manufaktur), governor akan menyesuaikan nilai output daya mekanik turbin supaya sesuai dengan daya listrik yang dibutuhkan sistem. Pada saat terjadi perubahan beban, governor akan menentukan *setting point* yang baru sesuai dengan keadaan aktual beban. Dengan pengaturan putaran ini diharapkan frekuensi listrik generator tetap berada di dalam interval yang bisa diterima dan generator tidak keluar dari sinkronisasi. Sedangkan pada mode *droop*, governor sudah memiliki *setting point* daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya pengaturan yang konstan ini, output daya listrik generator nilainya tetap dan adanya perubahan beban tidak akan mengakibatkan perubahan putaran turbin.

Governor turbin seluruh generator dimodelkan dengan GGOV3, model governor umum. Model ini dapat digunakan untuk merepresentasikan penggerak utama yang bervariasi dan dikendalikan oleh governor PID. Model ini cocok untuk merepresentasikan turbin gas.

#### **3.2.1.4 Exciter**

*Exciter* pada generator PABL-G101A, PABL-G101B, dan PABL-G101C diatur pada mode ST4B. Generator-generator lain selain ketiga generator yang terdapat di Pabelokan diatur pada mode AC3 [5].

### **3.2.2 Sistem Transmisi dan Distribusi**

CNOOC SES Ltd. menerapkan ANSI (*American National Standard Institute*) dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listriknya. Kabel bawah laut (*Submarine Cable*) dengan tegangan rating 35 kV, 15 kV, dan 5 kV digunakan untuk transmisi dan distribusi tenaga listrik dengan tegangan rating 34,5 kV, 13,8 kV, dan 4,16 kV. Frekuensi yang digunakan dalam sistem ini adalah 60 Hz. Karena jauhnya jarak transmisi dari daerah Selatan ke daerah Tengah maupun ke daerah Utara, maka beberapa digunakan beberapa transformator OLTC untuk memperbaiki nilai tegangan.

Tabel 3.3 Data Transformator OLTC pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.

No	ID Transformator	Kapasitas (MVA)	ID Bus yang Diatur
1	GA AVR	5	GA AVR_A
2	TX-25	5	CIND BBC
3	NORA AVR	10	NORA
4	KITA AVR	5	KA AVR2
5	RC AVR	5	RC LBS-2G
6	FARB AVR	1	FARB11-AVR
7	SUNA AVR	5	SUNA11
8	ZELP TR OLTC	15	ZELP11-1B(F5)
9	WIDPT T1	10	WIDP11A-5
10	WIDPT T2	10	WIDP11B-7
11	WIDP UNINDO	20	WIDP02
12	INTB TR1 PAUWELS	20	INTB11
13	WIDE AVR	15	WIDE AVR OUT
14	INTB R11	10	INTB13
15	TX-10	10	ZELP02
16	TRAFO AVR-B	25	ZELP02

dengan pengaturan transformator OLTC di sisi sekunder sebagai berikut:

*Deadband* =  $\pm 0,83$  %

Jumlah Tap = 33

*Range Tap* =  $\pm 10$  %

*Time Delay* = 20 s

*Operating Time* = 5 s

### 3.2.3 Beban

Beban total pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. sebesar  $\pm 95$  MW dengan persebaran beban seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Beban-beban tersebut berupa beban dinamik dan beban statis. Beban dinamik mencakup:

- Kompresor dan motor-motor pada *Gas Plant* dimodelkan sebagai motor induksi atau *lumped load* dengan tipe beban 100% dan faktor daya sebesar 0,82.
- Pompa-pompa minyak yang tersebar di seluruh daerah operasi dimodelkan sebagai *lumped load* dengan tipe beban 100% motor dan faktor daya sebesar 0,82.

c. *Utility* dimodelkan sebagai lumped load dengan tipe beban 20% motor dan 80% beban statis.

Beberapa pompa minyak yang berada dalam satu bagian platform (misalnya: Cinta B, Intan A) dan berada pada satu bus dimodelkan dalam 1-2 buah *lumped load* untuk menyederhanakan diagram satu garis sistem.

### 3.3 Simulasi Analisis Transien

Pada simulasi analisis transien digunakan metode iterasi Newton-Rhapson dengan iterasi maksimum sebanyak 75 dan ketelitian 0,00001. Pengaturan-pengaturan yang dilakukan terhadap sistem pembangkitan, sistem transmisi dan distribusi, serta beban pada simulasi analisis transien sama dengan pengaturan pada simulasi aliran daya. Tetapi, pada simulasi analisis transien terdapat pengaturan beberapa rele yang tidak difungsikan ketika melakukan simulasi aliran daya.

Pada sistem yang akan dianalisis, digunakan dua buah rele daya berarah (*directional power*) dan rele *undervoltage*. Sedangkan rele arus lebih (*overcurrent*) yang tersebar pada keseluruhan sistem diasumsikan bekerja dengan baik. Sehingga setiap gangguan diberikan selalu diikuti oleh tripnya CB terkait untuk mengisolasi gangguan terhadap sistem dalam waktu 6 cycles (0,1 detik). Selain itu, pengaturan rele yang lain diabaikan.

#### 3.3.1 Rele Daya Berarah (*Directional Power Relay*)

Digunakan dua buah *directional power relay* pada saluran transmisi dari Pabelokan menuju daerah Utara melalui Karmila. *Directional power relay* yang pertama diatur sebagai *underpower relay* dengan waktu tunda selama 0,01 detik yang berfungsi untuk mentripkan CB206 jika terjadi aliran daya balik dari daerah Utara menuju daerah Selatan akibat terjadinya gangguan atau lepasnya pembangkitan di daerah Selatan. Sedangkan *directional power relay* yang kedua berfungsi sebagai *overpower relay* dengan waktu tunda selama 0,01 detik yang berfungsi untuk mentripkan CB206 jika suplai daya dari daerah Selatan menuju daerah Utara lebih dari 13 MW.

### 3.3.2 Rele Tegangan Kurang (*UndervoltageRelay*)

*Undervoltagereley* digunakan untuk mengamankan beban dari tegangan yang berada di bawah nilai rating peralatan setelah periode waktu tertentu. Beban yang diamankan adalah pompa sumur minyak yang merupakan beban dinamis, yakni motor induksi. *Undervoltagereley* dipasang pada setiap pompa minyak dengan pengaturan tegangan minimum 85% dari tegangan rating bus dan waktu tunda selama 5 detik. *Undervoltagereley* tersebut akan beroperasi jika tegangan bus mencapai tegangan di bawah 85% tegangan rating bus selama 5 detik. *Undervoltagereley* akan mentripkan CB yang terhubung dengannya sehingga beban akan lepas dari sistem.

Tabel 3.4 Data *Undervoltage Relay*

No.	Platform	ID Circuit Breaker	ID Under Voltage Relay	ID Bus	Lumped Load (Wells)	Kapasitas Lumped Load (MW)
1	CINTA	CINA1	VR11	Bus150	CINA-4,16KV	0,207
2		CINB1	VR2	CINB BUS C	CINB 6,7 CINC 11,14	0,605
3		CINB2	VR3	CINB BUS A	CINB 5,8	0,415
4		CINC1	VR1	BUS-9	Lump17	0,323
5		CINC2	VR4	CINC-480V	CINC -480V	0,2
6		CINC3	VR5	CINB BUS B	CINC 3,7,10	0,314
7		CINC4	VR101	Bus313	CINC 5s,6,8,9,12,16	0,816
8		CIND1	VR7	Bus163	CIND 1,2,4,7,10,13,14,15	0,695
9		CINE1	VR13	Bus165	CINE 1,4,11,13,14	0,538
10		CINF1	VR6	Bus161	CINF 11,15	0,371
11		CING1	VR12	Bus159	CING 3,8,10,11	0,446
12		CINH1	VR16	Bus152	CINH 1,5,7,11	0,812
13	SELATAN	SELA1	VR10	SELA	SELA 1,2,5,8,9,10,13	0,885
14	KITTY	KITA1	VR9	Bus220	KITA 1,2,4,6,7,8	0,338
15	LITA	LITA1	VR8	Bus293	LITA 3	0,036
16	NORA	NORA1	VR15	Bus227	NORA 1,3,5,6,7	0,442
17	SURATMI	SURATMI1	VR14	Bus317	SURATMI	0,432
18	RAMA	RAMA1	VR22	RA LOCAL1	RAMA 1,9	0,479
19		RAMA2	VR23	Bus285	RAMA 4,5	0,068
20		RAMB1	VR26	Bus236	RAMB 456	0,175
21		RAMB2	VR27	Bus241	RAMB 1	0,151
22		RAMC1	VR24	Bus253	RAMC 1	0,181

23		RAMD1	VR27	Bus291	RAMD 2,3,7,8,12	0,355
24		RAMF1	VR17	Bus263	RAMF 13	0,153
25		RAMG1	VR19	Bus268	RAMG 1,4,10,13	0,304
26		RAMH1	VR20	Bus273	RAMH 3,4,5,9	0,487
27		RAMI1	VR21	Bus277	RAMI 2,4,8	0,091
28	<b>EAST RAMA</b>	EAST RAMA1	VR18	Bus265	EAST RAMA	1,314
29		NWB1	VR28	Bus170	NWB 5	0,09
30	<b>WANDA</b>	SWA, NWA	VR29	Bus174	SWA 2,5,8 NWA 2s.4,5	0,644
31		WANDA 1	VR30	Bus189	WANDA1	0,281
32		ZELDA1	VR31	ZELP25	ZELDA A	0,035
33		ZELB1	VR38	ZELB21	ZELB 16	0,046
34	<b>ZELDA</b>	ZELC1	VR39	ZELC21	ZELC 16	0,275
35		ZELD1	VR37	ZELD21	ZELD	0,286
36		ZELE1	VR32	ZELE21	ZELE 2;6;9;10	0,201
37		SOUTH ZELDA1	VR34	Bus309	SOUTH ZELDA	0,198
38	<b>ATTI</b>	ATTI1	VR33	Bus305	ATTI 8,1s	0,207
39	<b>TITI</b>	TITA1	VR35	TITA21	TITA 5;16	0,116
40	<b>KARTINI</b>	KARTINI1	VR36	Bus297	KARTINI 4,6,7	0,439
41	<b>FARIDA</b>	FARB1	VR40	FARB21	FARB 3;6;7;10;12;15	0,335
42		FARC1	VR43	FARC21	FARC 9;10;11;12	0,09
43	<b>THERESIA</b>	THERESIA1	VR44	Bus301	THERESIA 5	0,05
44	<b>YVONE</b>	YVOA1	VR48	YVOA21	YVOA 6	0,09
45		YVOB1	VR41	YVOB21	YVOB 3;8	0,177
46		KRIA1	VR47	KRIA21	KRIA 1;5;6;9	0,333
47		KRIB1	VR42	KRIB21	KRIB 3;4	0,103
48		KRIB2	VR42	KRIB21	KRIB 5,9	0,169
49	<b>KRISNA</b>	KRIC1	VR45	KRIC21 1KV	KRIC 2;4;8;9	0,342
50		KRID1	VR46	KRID21	KRID 1;2;3;6;7;8;9;12	0,389
51		KRIE1	VR49	KRIE21	KRIE 2;4;5;7;8	0,204
52	<b>SUNDARI</b>	SUNA1	VR50	Bus331	SUNA 5;6;8;10;13	0,82
53		SUNB1	VR51	SUNB21	SUNB 1;2;4;5;6;7;8	0,973
54	<b>KARMILA</b>	KARA1	VR52	T2 S	KARM 4,13	0,669
55	<b>VITA</b>	VITA1	VR53	VITA21	well-1;4;5	1,045
56		WIDA1	VR54	WIDA13	L-21	1,4
57		WIDA2	VR55	WIDA21	WIDA 39,36,2s,7,8,28,3,25	1,519
58	<b>WIDURI</b>	WIDA3	VR57	Bus144	WIDA 20,25,14,26	0,858
59		WIDA4	VR56	Bus139	WIDA 32,01,27	0,922
60		WIDB1	VR83	WIDB21	WIDB 4,17,22,18,16,14,25	1,446

61		WIDB2	VR84	WIDB12	WIDB 23,31	1,099
62		WIDB3	VR85	BUS-29	WIDB 33,32,36,10,3	1,132
63		WIDB4	VR86	WIDB13	WIDB 8,20	1,005
64		WIDC1	VR74	WIDCT20C LV	Well-banyak	1,336
65		WIDC2	VR75	WIDC23	HPS-P310	0,448
66		WIDC3	VR76	WIDC22	Well-37	0,348
67		WIDC4	VR77	WIDC21	Well-30,31,41	1,094
68		WIDD1	VR58	WIDD21	L-24	1,747
69		WIDD2	VR59	WIDDT20B LV	L-23	0,626
70		WIDD3	VR62	WIDDC11	L-54	1,223
71		WIDD4	VR61	WIDD13	L-28	1,848
72		WIDD5	VR60	M-54	Lump6	1,342
73		WIDE1	VR68	WIDE21	well-2;3;13;14	0,791
74		WIDE2	VR69	WIDE22	well-8;23	0,306
75		WIDE3	VR70	WIDE13	well-04	0,42
76		WIDF1	VR65	WIDF21	well-1 saja	0,207
77		WIDG1	VR64	WIDG21	well-1,8,9	0,516
78		WIDG2	VR63	WIDG11	well-3	0,944
79		WIDG3	VR63	WIDG11	well-5	0,504
80		WIDH1	VR78	Bus243	well-4;7;13;16	0,359
81		WIDH2	VR79	WIDH11	well - 15	0,152
82	<b>INTAN</b>	INTA1	VR91	INTA21	L 15;6	1,514
83		INTA2	VR93	INTA13	L 11	0,312
84		INTA3	VR93	INTA13	Lump19	0,722
85		INTA4	VR92	INTA12	L-12;2;9	1,114
86		INTA5	VR94	INTAC21	L-13;18;21;22;23	0,613
87		INTA6	VR94	INTAC21	Lump27	0,722
88		INTB1	VR90	INTB14	L-14;6;7	1,309
89		INTB2	VR89	INTB15	L-33	0,98
90		INTB3	VR88	INTB21	L-36	2,285
91		INTB4	VR87	Bus274	L-37_A	0,913
92	<b>NORTH EAST INTAN</b>	NEIA1	VR95	NEIA13	well-10;12	0,984
93		NEIA2	VR96	NEIA21A	well-3;5	0,49
94		NEIA3	VR97	NEIA21B	well-4;6;11;15;19	1,487
95		NEIA4	VR98	NEIA22	well-15	0,877
96		NEIAC1	VR99	NEIAC11	well-1	0,383
97	NEIAC2	VR100	NEIAC21	well-20;25	1,815	
98	<b>INDRI</b>	INDA1	VR80	INDA21	well-22	0,226
99		INDA2	VR81	INDA22	well-6;18	0,652
100		INDA3	VR82	INDA23	well- 2;5;17;20;23;24	0,719

101	WINDRI	WINA1	VR67	WINA21	well-3;5;7;13;15	0,791
102		WINA2	VR66	WINA 11	well-20	0,06
103		WINA3	VR66	WINA 11	well-21;22	0,125
104	AIDA	AIDA1	VR71	AIDA13	well-10;15;3;1	1,663
105		AIDA2	VR72	Bus476	well-15;	0,348
106		AIDA3	VR73	Bus479	well-2;5;13	0,892

keterangan:

	= Daerah Operasi Selatan ( <i>South</i> )
	= Daerah Operasi Tengah ( <i>Central</i> )
	= Daerah Operasi Utara ( <i>North</i> )

Beberapa *undervoltage relay* diatur pada tegangan minimum kurang dari 85% karena nilai tegangan pada bus terkait kurang dari 85% akibat besarnya jatuh tegangan (jarak yang jauh dari sumber). Hal ini dilakukan sebagai penyesuaian model simulasi terhadap kondisi sebenarnya. Pada kondisi sebenarnya, operasi normal sistem tidak melakukan pelepasan beban dengan *undervoltage relay* karena pada setiap platform terdapat transformator yang tapnya diatur sedemikian hingga nilai tegangannya tidak berada di bawah 85%. Oleh karena itu, pada skripsi ini dilakukan pengaturan tegangan minimum yang berbeda pada *undervoltage relay* sesuai dengan nilai tegangan pada masing-masing bus terkait sebagai kompensasi dari tidak spesifiknya pengaturan tegangan sekunder pada transformator di setiap platform.

Tabel 3.5 Data *Undervoltage Relay* dengan Pengaturan Tegangan Minimum di bawah 85% Tegangan Nominal

ID Circuit Breaker	Pengaturan Tegangan Minimum pada Rele (%)	Pengaturan Waktu Tunda pada Rele (s)
CINB1	80	4,8
CINB2	80	4,8
CINC2	82	4,9
CINC3	81	4,8
CINC4	84	4,8
CIND1	84	4,8
CINE1	84	4,8

SELA1	78	4,8
KITA1	80	4,8
WIDB3	84	5
WIDC1	83	5
WIDD5	83	5
WIDE1	83	5
WIDG1	83	5
INTA1	83	5
INTA5	82	5
INTA6	82	5
INTB3	84	5
NEIA1	84	5
NEIA3	80	5
NEIA4	80	5
NEIAC1	84	5
NEIAC2	79	5
WINA1	83	5
AIDA1	84	5
AIDA2	84	5
AIDA3	82	5

### 3.3.3 Skenario Gangguan Besar

Pada simulasi analisis transien akan dilakukan 5 skenario gangguan besar yang berbeda, antara lain:

- a. S1: Generator PABL G101A Lepas
- b. S2: Generator SFX GTG1 Lepas
- c. S3: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Pabelokan-Zelda (Kabel C-2\_A)
- d. S4: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Pabelokan-Krisna (Kabel C-3\_A)
- e. S5: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Karmila-Widuri Proses (Kabel C-18)

Pemilihan skenario dilakukan berdasarkan pertimbangan jenis gangguan besar yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. [5]. Skenario lepasnya generator dari sistem dilakukan pada generator-generator berkapasitas besar. Di sisi lain, skenario gangguan tiga fasa dipilih karena menghasilkan arus gangguan terbesar dibandingkan dengan berbagai jenis

gangguan lainnya. Seluruh gangguan diskenariokan untuk terjadi pada  $t=25s$  karena berdasarkan simulasi yang dilakukan, sistem sudah dapat dikatakan stabil pada  $t=25s$ . Setiap skenario dicatat hasilnya selama minimal 60s untuk melihat kondisi transien sistem sebelum dan sesudah terjadi gangguan. Untuk Skenario gangguan 3 hingga Skenario gangguan 5, dilakukan pembukaan (trip) CB (*Circuit Breaker*) 0,1 detik setelah terjadi skenario gangguan. Hal ini dilakukan untuk mengisolasi gangguan dari keseluruhan sistem. CB yang diatur supaya trip adalah CB-CB yang melindungi saluran transmisi terkait.

Detail aksi yang dilakukan dalam simulasi analisis transien adalah sebagai berikut:

a. S1: Generator Pabelokan Lepas

Detik ke-	Tipe Divais	ID Divais	Aksi
15	Circuit Breaker	CB49	Buka

b. S2: Generator SFX GTG1 Lepas

Detik ke-	Tipe Divais	ID Divais	Aksi
15	Circuit Breaker	SFX11A-G1	Buka

c. S3: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Pabelokan-Zelda

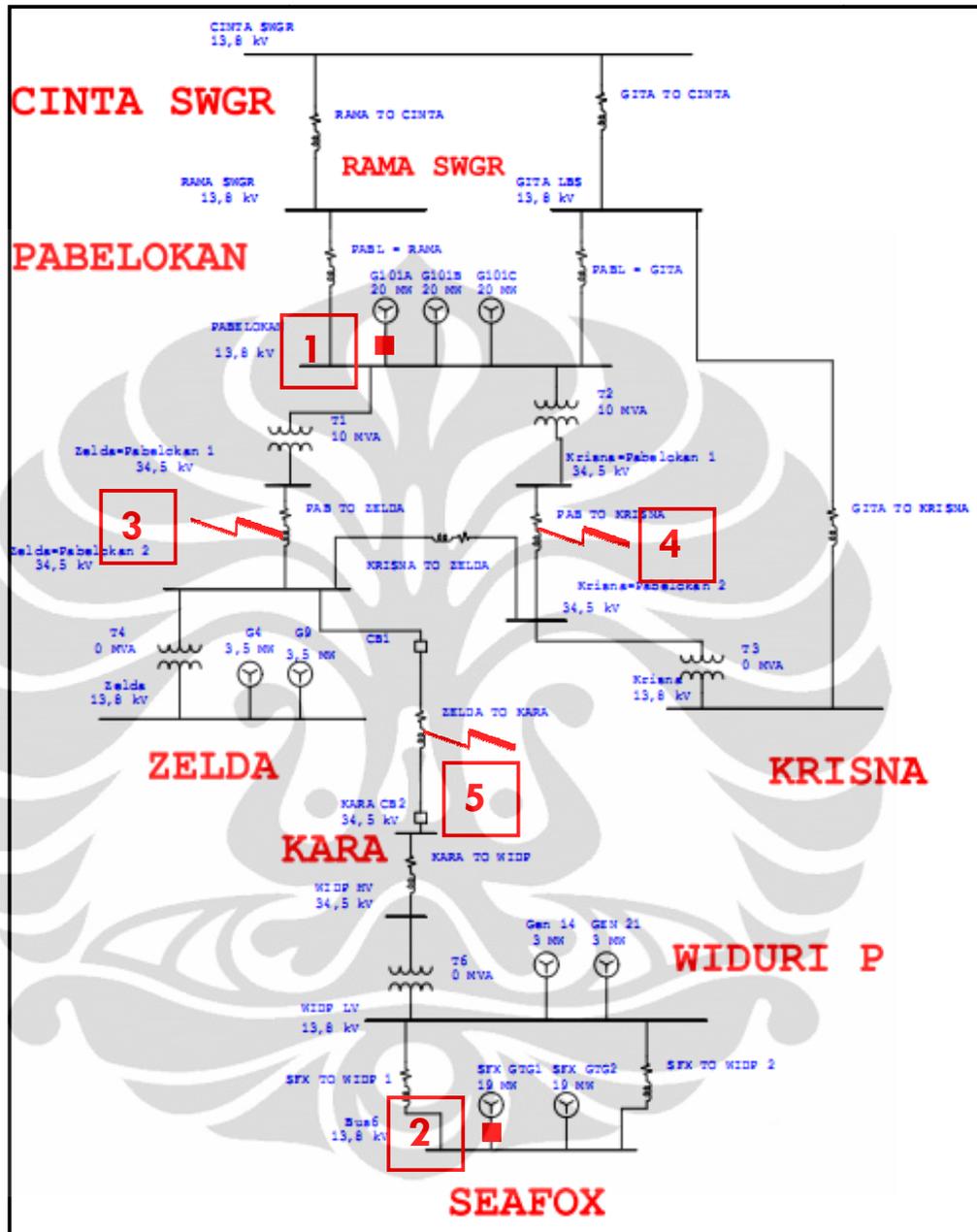
Detik ke-	Tipe Divais	ID Divais	Aksi
25	Kabel	C-2_A	Gangguan 3 fasa
25,1	Circuit Breaker	CB462	Buka
25,1	Circuit Breaker	CB465	Buka

d. S4: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Pabelokan-Krisna

Detik ke-	Tipe Divais	ID Divais	Aksi
25	Kabel	C-3_A	Gangguan 3 fasa
25,1	Circuit Breaker	CB463	Buka
25,1	Circuit Breaker	CB464	Buka

e. S5: Gangguan 3 fasa pada saluran transmisi Zelda-Karmila

Detik ke-	Tipe Divais	ID Divais	Aksi
25	Kabel	C-18	Gangguan 3 fasa
25,1	Circuit Breaker	CB469	Buka
25,1	Circuit Breaker	CB203	Buka



Gambar 3.2 Posisi Skenario Gangguan pada Simulasi Transien

## BAB IV

### SIMULASI DAN ANALISIS

#### 4.1 Simulasi dan Analisis Aliran Daya (Analisis Statis)

##### 4.1.1 Analisis Kurva Q-V

Dalam skripsi ini dilakukan analisis statis dengan pendekatan kurva Q-V di seluruh bus beban (sumur minyak) dalam sistem. Dilakukan pengujian sensitivitas V-Q pada seluruh bus beban (106 bus beban) dengan cara memberikan injeksi daya reaktif secara bertahap untuk melihat pengaruhnya terhadap nilai tegangan pada setiap bus beban dengan nilai P dijaga tetap. Selain diberikan injeksi daya reaktif, juga dilakukan penambahan beban reaktif sehingga bus mencapai titik kritis stabilitas dimana dalam simulasi ditunjukkan dengan tidak konvergensinya simulasi aliran daya.

Tabel 4.1 Sensitivitas Q-V Seluruh Bus Beban

No.	Platform	ID Circuit Breaker	ID Under Voltage Relay	ID Bus (2)	STABILITAS (SENSITIVITAS Q-V)
1	CINTA	CINA1	VR11	Bus150	
2		CINB1	VR2	CINB BUS C	
3		CINB2	VR3	CINB BUS A	
4		CINC1	VR1	BUS-9	OPEN
5		CINC2	VR4	CINC-480V	
6		CINC3	VR5	CINB BUS B	
7		CINC4	VR101	Bus313	
8		CIND1	VR7	Bus163	
9		CINE1	VR13	Bus165	
10		CINF1	VR6	Bus161	
11		CING1	VR12	Bus159	
12		CINH1	VR16	Bus152	
13	SELATAN	SELA1	VR10	SELA	
14	KITTY	KITA1	VR9	Bus220	
15	LITA	LITA1	VR8	Bus293	
16	NORA	NORA1	VR15	Bus227	

17	<b>SURATMI</b>	SURATMI1	VR14	Bus317	
18	<b>RAMA</b>	RAMA1	VR22	RA LOCAL1	
19		RAMA2	VR23	Bus285	
20		RAMB1	VR26	Bus236	
21		RAMB2	VR27	Bus241	
22		RAMC1	VR24	Bus253	
23		RAMD1	VR27	Bus291	
24		RAMF1	VR17	Bus263	
25		RAMG1	VR19	Bus268	
26		RAMH1	VR20	Bus273	
27		RAMI1	VR21	Bus277	
28	<b>EAST RAMA</b>	EAST RAMA1	VR18	Bus265	
29	<b>WANDA</b>	NWB1	VR28	Bus170	
30		SWA, NWA	VR29	Bus174	
31		WANDA 1	VR30	Bus189	
32	<b>ZELDA</b>	ZELDA1	VR31	ZELP25	
33		ZELB1	VR38	ZELB21	
34		ZELC1	VR39	ZELC21	
35		ZELD1	VR37	ZELD21	
36		ZELE1	VR32	ZELE21	
37		SOUTH ZELDA1	VR34	Bus309	
38	<b>ATTI</b>	ATTI1	VR33	Bus305	
39	<b>TITI</b>	TITA1	VR35	TITA21	
40	<b>KARTINI</b>	KARTINI1	VR36	Bus297	
41	<b>FARIDA</b>	FARB1	VR40	FARB21	
42		FARC1	VR43	FARC21	
43	<b>THERESIA</b>	THERESIA1	VR44	Bus301	
44	<b>YVONE</b>	YVOA1	VR48	YVOA21	
45		YVOB1	VR41	YVOB21	
46	<b>KRISNA</b>	KRIA1	VR47	KRIA21	
47		KRIB1	VR42	KRIB21	
48		KRIB2	VR42	KRIB21	
49		KRIC1	VR45	KRIC21 1KV	
50		KRID1	VR46	KRID21	
51		KRIE1	VR49	KRIE21	
52	<b>SUNDARI</b>	SUNA1	VR50	Bus331	
53		SUNB1	VR51	SUNB21	
54	<b>KARMILA</b>	KARA1	VR52	T2 S	
55	<b>VITA</b>	VITA1	VR53	VITA21	
56	<b>WIDURI</b>	WIDA1	VR54	WIDA13	

57		WIDA2	VR55	WIDA21	
58		WIDA3	VR57	Bus144	
59		WIDA4	VR56	Bus139	
60		WIDB1	VR83	WIDB21	
61		WIDB2	VR84	WIDB12	
62		WIDB3	VR85	BUS-29	
63		WIDB4	VR86	WIDB13	
64		WIDC1	VR74	WIDCT20C LV	
65		WIDC2	VR75	WIDC23	
66		WIDC3	VR76	WIDC22	
67		WIDC4	VR77	WIDC21	
68		WIDD1	VR58	WIDD21	
69		WIDD2	VR59	WIDDT20B LV	
70		WIDD3	VR62	WIDDC11	
71		WIDD4	VR61	WIDD13	
72		WIDD5	VR60	M-54	
73		WIDE1	VR68	WIDE21	
74		WIDE2	VR69	WIDE22	
75		WIDE3	VR70	WIDE13	
76		WIDF1	VR65	WIDF21	
77		WIDG1	VR64	WIDG21	
78		WIDG2	VR63	WIDG11	
79		WIDG3	VR63	WIDG11	
80		WIDH1	VR78	Bus243	
81		WIDH2	VR79	WIDH11	
82		INTA1	VR91	INTA21	
83		INTA2	VR93	INTA13	
84		INTA3	VR93	INTA13	
85		INTA4	VR92	INTA12	
86	<b>INTAN</b>	INTA5	VR94	INTAC21	
87		INTA6	VR94	INTAC21	
88		INTB1	VR90	INTB14	
89		INTB2	VR89	INTB15	
90		INTB3	VR88	INTB21	
91		INTB4	VR87	Bus274	
92	<b>NORTH EAST INTAN</b>	NEIA1	VR95	NEIA13	
93		NEIA2	VR96	NEIA21A	OPEN
94		NEIA3	VR97	NEIA21B	
95		NEIA4	VR98	NEIA22	
96		NEIAC1	VR99	NEIAC11	
97		NEIAC2	VR100	NEIAC21	

98	INDRI	INDA1	VR80	INDA21	
99		INDA2	VR81	INDA22	
100		INDA3	VR82	INDA23	
101	WINDRI	WINA1	VR67	WINA21	
102		WINA2	VR66	WINA 11	
103		WINA3	VR66	WINA 11	
104	AIDA	AIDA1	VR71	AIDA13	
105		AIDA2	VR72	Bus476	
106		AIDA3	VR73	Bus479	

Keterangan:

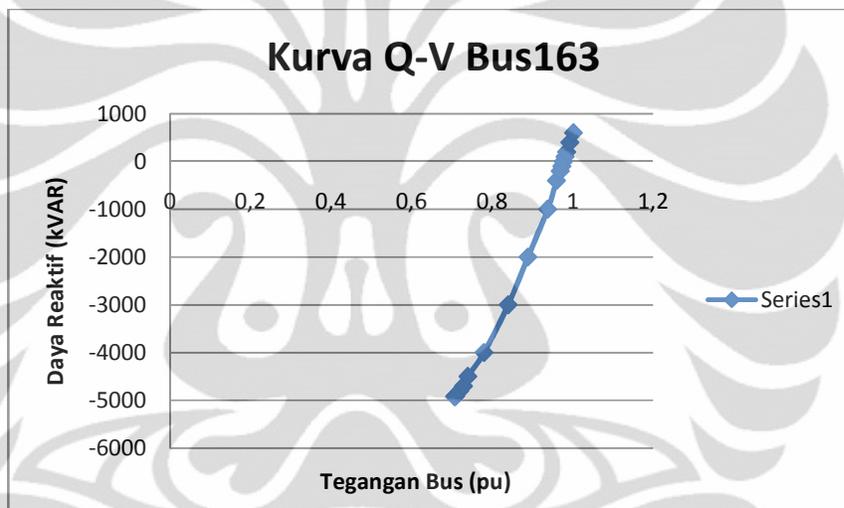
	= Daerah Operasi Selatan ( <i>South</i> )
	= Daerah Operasi Tengah ( <i>Central</i> )
	= Daerah Operasi Utara ( <i>North</i> )
	= Bus beban menunjukkan kecenderungan kurva Q-V normal (Stabil)
	= Bus beban tidak menunjukkan kecenderungan Kurva Q-V normal (Tidak Stabil)

Bus-bus beban yang dengan kecenderungan normal kurva Q-V menunjukkan bahwa adanya perubahan daya reaktif (baik disuplai maupun diserap) menyebabkan perubahan tegangan yang normal sebagaimana karakteristik kurva Q-V yang telah dijelaskan pada bab Landasan Teori. Semakin besar daya reaktif yang disuplai, tegangan bus beban semakin naik. Sebaliknya, ketika beban reaktif semakin besar maka tegangan bus beban semakin turun.

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa seluruh bus beban yang terdapat di daerah operasi Utara (*North*) tidak menunjukkan kecenderungan normal kurva Q-V sehingga bus-bus tersebut dapat dinyatakan “rapuh” (tegangannya sangat mudah menjadi tidak stabil), sedangkan bus-bus beban yang tersebar di daerah operasi Selatan (*South*) dan Tengah (*Central*) seluruhnya mengikuti kecenderungan normal kurva Q-V (stabil). Tegangan bus-bus beban di daerah Selatan dan Tengah akan stabil dengan batasan tertentu. Batasan tersebut akan dijelaskan lebih lanjut pada sub bab selanjutnya (Sub Bab 4.1.2).

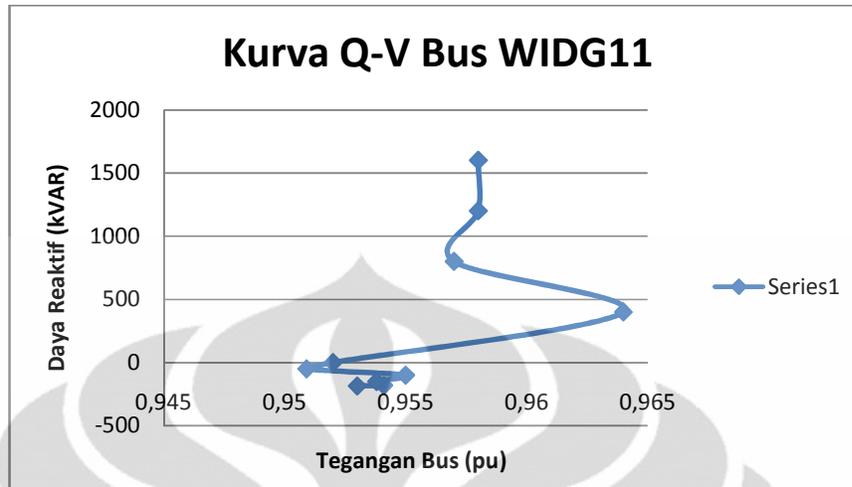
Berdasarkan data yang telah disajikan pada Bab sebelumnya, suplai daya di daerah Utara (44 MW dengan faktor daya generator 0,8) lebih kecil daripada jumlah beban daerah Utara (52 MW dengan faktor daya beban 0,82). Akibatnya, dibutuhkan adanya suplai daya tambahan dari pembangkitan di daerah

Selatan. Selain itu, jarak beban (*platform*) yang cukup jauh dari bus generator Seafox dan generator di Widuri Proses (Gen14 dan GEN21) mengakibatkan besarnya rugi-rugi daya saat transmisi. Kedua hal tersebut merupakan penyebab utama rapuhnya bus-bus beban di daerah Utara. Sehingga apabila terjadi kenaikan beban (misalnya: penambahan sumur baru) pada bus yang sama atau terjadinya gangguan-gangguan kecil dapat menyebabkan bus tersebut kehilangan stabilitasnya. Hilangnya stabilitas bus dapat mengganggu unjuk kerja beban yang terhubung langsung dengan bus tersebut. Kemungkinan terburuknya adalah terjadinya pelepasan beban yang terhubung dengan bus terkait.



Gambar 4.1 Kurva Q-V Bus163

Perhatikan Gambar 4.1, Bus163 adalah bus beban CIND1 yang berada di daerah Selatan. Kurva Q-V Bus 163 membentuk kurva karakteristik Q-V normal pada bagian yang stabil (di sebelah kanan titik minimum kurva), sedangkan bagian kiri kurva tersebut tidak dapat digambarkan karena ketidakstabilan sistem diindikasikan oleh tidak konvergenya simulasi aliran daya. Daya reaktif bernilai positif menunjukkan adanya injeksi daya reaktif pada bus terkait, sedangkan daya reaktif bernilai negatif menunjukkan adanya penambahan beban reaktif.



Gambar 4.2 Kurva Q-V Bus WIDG11

Sebaliknya, Kurva Q-V pada Bus WIDG11 (Gambar 4.2) menunjukkan karakteristik yang tidak sesuai. Pada operasi normal yang stabil, penambahan suplai daya reaktif berbanding lurus dengan kenaikan nilai tegangan bus, sedangkan penambahan beban berbanding terbalik dengan nilai tegangan bus.

#### 4.1.2 Batas Stabilitas Tegangan

Dengan kurva Q-V, batas stabilitas tegangan bus beban pada operasi normal dapat diketahui, walaupun hanya terbatas pada bus beban yang memiliki karakteristik Q-V sesuai. Dilakukan pengujian pada setiap bus beban di daerah operasi Selatan dan Tengah dan didapatkan batas stabilitas tegangan (titik kritis) pada setiap bus beban. Karena analisis statis ini digunakan untuk mengetahui stabilitas sistem pada keadaan operasi normal, maka batas stabilitas dinyatakan dalam kVAR dengan faktor daya sebesar 0,82. Batas stabilitas ini menggambarkan besarnya kapasitas pembeban yang dapat ditambahkan pada bus tersebut dan diasumsikan beban yang akan ditambah adalah beban dengan karakteristik yang sama dengan beban lama. Selain itu, batas stabilitas ini ditentukan dengan asumsi bahwa kenaikan beban yang terjadi hanya pada bus yang diuji.

Tabel 4.2 Batas Stabilitas Tegangan Bus Beban di Daerah Operasi Selatan (*South*) dan Daerah Operasi Tengah (*Central*)

No.	Platform	ID Circuit Breaker	ID Under Voltage Relay	ID Bus	Batas Stabilitas (kVAR), pf=0,82
1	CINTA	CINA1	VR11	Bus150	1749,00
2		CINB1	VR2	CINB BUS C	1799,00
3		CINB2	VR3	CINB BUS A	1322,00
4		CINC1	VR1	BUS-9	OPEN
5		CINC2	VR4	CINC-480V	2601,00
6		CINC3	VR5	CINB BUS B	1679,00
7		CINC4	VR101	Bus313	3505,00
8		CIND1	VR7	Bus163	2478,00
9		CINE1	VR13	Bus165	3240,00
10		CINF1	VR6	Bus161	3286,00
11		CING1	VR12	Bus159	3172,00
12		CINH1	VR16	Bus152	2894,00
13	SELATAN	SELA1	VR10	SELA	1321,00
14	KITTY	KITA1	VR9	Bus220	1945,00
15	LITA	LITA1	VR8	Bus293	1673,81
16	NORA	NORA1	VR15	Bus227	3546,00
17	SURATMI	SURATMI1	VR14	Bus317	1073,00
18	RAMA	RAMA1	VR22	RA LOCAL1	5757,00
19		RAMA2	VR23	Bus285	1900,49
20		RAMB1	VR26	Bus236	1846,00
21		RAMB2	VR27	Bus241	1951,00
22		RAMC1	VR24	Bus253	3198,00
23		RAMD1	VR27	Bus291	3198,00
24		RAMF1	VR17	Bus263	2500,00
25		RAMG1	VR19	Bus268	1495,00
26		RAMH1	VR20	Bus273	3448,00
27		RAMI1	VR21	Bus277	1818,89
28	EAST RAMA	EAST RAMA1	VR18	Bus265	2903,00
29	WANDA	NWB1	VR28	Bus170	1572,04
30		SWA, NWA	VR29	Bus174	1462,00
31		WANDA 1	VR30	Bus189	712,00
32	ZELDA	ZELDA1	VR31	ZELP25	482,56
33		ZELB1	VR38	ZELB21	388,20
34		ZELC1	VR39	ZELC21	365,00
35		ZELD1	VR37	ZELD21	360,00
36		ZELE1	VR32	ZELE21	374,00

37		SOUTH ZELDA1	VR34	Bus309	371,00
38	<b>ATTI</b>	ATTI1	VR33	Bus305	367,00
39	<b>TITI</b>	TITA1	VR35	TITA21	437,30
40	<b>KARTINI</b>	KARTINI1	VR36	Bus297	322,00
41	<b>FARIDA</b>	FARB1	VR40	FARB21	730,00
42		FARC1	VR43	FARC21	560,04
43	<b>THERESIA</b>	THERESIA1	VR44	Bus301	524,51
44	<b>YVONE</b>	YVOA1	VR48	YVOA21	522,04
45		YVOB1	VR41	YVOB21	519,00
46	<b>KRISNA</b>	KRIA1	VR47	KRIA21	592,00
47		KRIB1	VR42	KRIB21	605,88
48		KRIB2	VR42	KRIB21	
49		KRIC1	VR45	KRIC21 1KV	594,00
50		KRID1	VR46	KRID21	585,00
51		KRIE1	VR49	KRIE21	625,00
52	<b>SUNDARI</b>	SUNA1	VR50	Bus331	237,00
53		SUNB1	VR51	SUNB21	294,00
54	<b>KARMILA</b>	KARA1	VR52	T2 S	172,00

Keterangan:

	= Daerah Operasi Selatan ( <i>South</i> )
	= Daerah Operasi Tengah ( <i>Central</i> )

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa bus-bus beban di daerah operasi Selatan mempunyai batas stabilitas tegangan yang lebih besar daripada bus-bus beban di daerah operasi Tengah. Berdasarkan Tabel 3.1, daerah Selatan memiliki kapasitas suplai daya terbesar dengan 3 buah generator, masing-masing berkapasitas 20MW (dengan faktor daya 0,8), sedangkan kebutuhan daya beban di daerah Selatan hanya sebesar 32MW dan 22MVAR. Di sisi lain, beban-beban di daerah Tengah (platform Zelda dan Krisna) sebesar 11MW dan 15MVAR disuplai oleh generator di Zelda (G4 dan G9) sebesar 7MW dan 4,89MVAR, sisanya disuplai dari pembangkit di daerah Selatan melalui transmisi sejauh 100.000ft (Zelda) dan 130.000ft (Krisna). Jauhnya transmisi daya dari daerah Selatan ke daerah Tengah menyebabkan besarnya rugi-rugi daya transmisi. Akibatnya, bus-bus beban di daerah Tengah memiliki batas stabilitas tegangan (kVAR) yang lebih kecil daripada bus-bus beban di daerah Selatan.

## 4.2 Simulasi dan Analisis Transien (Analisis Dinamis)

Semua skenario yang telah dijabarkan pada Bab sebelumnya disimulasikan menggunakan ETAP 7.0.0 dengan modul analisis transien (*transient analysis*). Dari setiap skenario yang dijalankan, didapatkan daftar aksi stabilitas transien, grafik daya aktif dan daya reaktif keluaran generator, grafik arus eksitasi (arus medan), grafik tegangan pada bus generator dan bus beban tertentu. Bus beban yang dianalisis adalah beberapa bus beban yang bebannya dilepas karena operasi *under voltage relay*. Kemudian dibandingkan dengan grafik bus beban dimana sistem tidak menggunakan *under voltage relay* sebagai salah satu cara untuk mengembalikan nilai tegangan yang turun akibat terjadinya gangguan, terutama gangguan-gangguan besar.

Setiap grafik menggambarkan keadaan transien sistem sebelum dan setelah terjadi gangguan. Beberapa hal yang akan dianalisis pada bab ini antara lain:

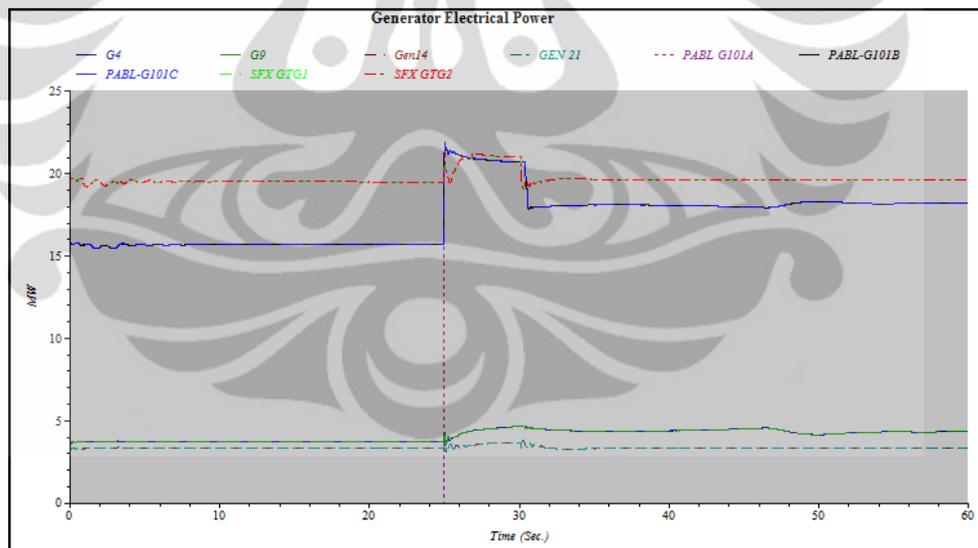
- a. Daya aktif generator
  - Menunjukkan kesesuaian daya yang disuplai generator sebelum dan sesudah terjadinya gangguan (termasuk jika terjadi pelepasan beban).
  - Menunjukkan bisa atau tidaknya generator bertahan dan kembali mencapai kestabilan (tidak *collapse*) baik setelah melakukan pelepasan beban atau tidak.
  - Membandingkan dengan sistem tanpa UVR (*Under Voltage Relay*).
- b. Tegangan bus generator, arus eksitasi (arus medan), dan daya reaktif generator
  - Menunjukkan hubungan antara perubahan tegangan bus generator terhadap perubahan arus eksitasi yang kemudian berpengaruh terhadap perubahan daya reaktif keluaran generator.
- c. Tegangan Bus Beban
  - Membandingkan tegangan bus beban pada sistem yang menggunakan *under voltage relay* dengan sistem yang tidak menggunakan *under voltage relay*.

#### 4.2.1 S1: Lepasnya Generator PABL-G101A

##### a. Daya Aktif Generator

Tabel 4.3 Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S1

Time (sec)	Event	Device ID	Action	Action By
25,000	1	CB49	Open	Study Case
25,083	Dir. Pwr Relay	CB206	Open	Directional Power Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD1	Open	Voltage Relay
30,362	Voltage Relay	CIND1	Open	Voltage Relay
30,372	Voltage Relay	CINC3	Open	Voltage Relay
30,386	Voltage Relay	CINE1	Open	Voltage Relay
30,436	Voltage Relay	SELA1	Open	Voltage Relay
30,470	Voltage Relay	CINA1	Open	Voltage Relay
30,487	Voltage Relay	CINF1	Open	Voltage Relay
30,510	Voltage Relay	CINC4	Open	Voltage Relay
30,527	Voltage Relay	EAST RAMA1	Open	Voltage Relay



Gambar 4.3 Grafik Daya Aktif Generator pada S1

Gambar 4.3 menunjukkan suplai awal masing-masing generator Seafox sebesar 19,5MW. Ketika terjadi gangguan berupa lepasnya Generator PABL-G101A pada detik ke-25, terjadi aliran daya balik dari daerah operasi Utara menuju Zelda yang menyebabkan beroperasinya *reverse power relay* pada jalur Zelda-Karmila. Hal ini mengakibatkan suplai daya dari daerah Selatan ke Utara

menjadi terputus sehingga daerah Utara mengalami kekurangan suplai daya sekitar 4MW. Sesaat setelah terjadi gangguan, suplai daya aktif generator Seafox naik secara tajam mencapai 21,3MW, kemudian turun dan mencoba memenuhi kebutuhan beban daerah Utara. Karena generator tidak dapat memenuhi seluruh kebutuhan beban, maka terjadi kekurangan suplai daya (terutama daya reaktif) pada beberapa beban sehingga terjadi pelepasan beban di daerah Utara sebesar 3,195MW.

Suplai daya awal ketiga generator di Pabelokan masing-masing sebesar 15,7MW naik menjadi menjadi sekitar 20,7MW untuk dua generator ketika terjadi gangguan generator PABL-G101A lepas pada detik ke-25. Daya suplai yang hilang akibat lepasnya satu generator Pabelokan ditanggung oleh kedua generator Pabelokan yang tersisa sama besar, setelah dikurangi besarnya daya yang pada kondisi normal dikirim dari daerah Selatan ke daerah Utara melalui Karmila (Kara).

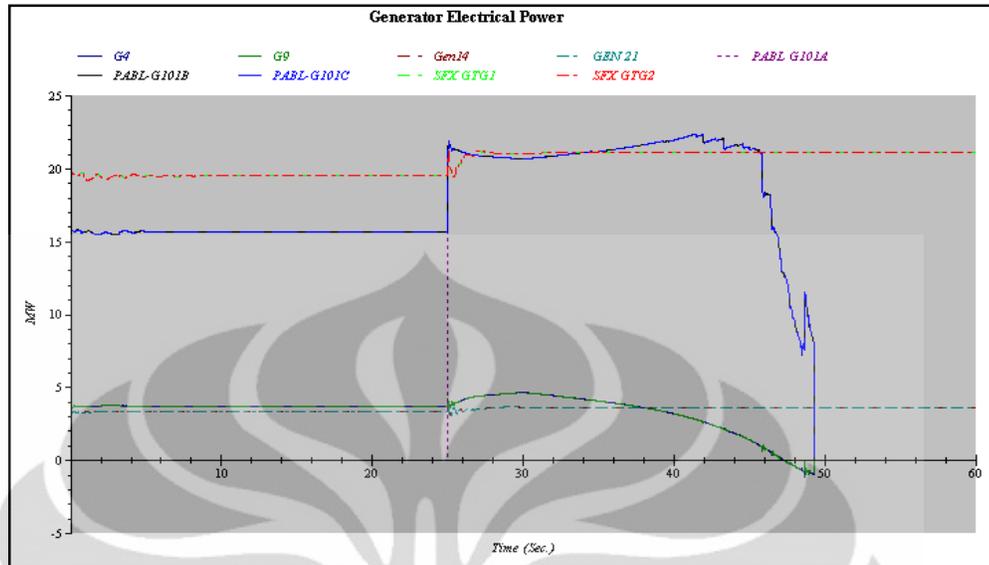
Suplai daya awal masing-masing generator Pabelokan	= 15,7MW
Lepasnya PABL-G101A	= 16MW
Lepasnya jalur Zelda-Karmila	= 4MW

Sehingga daya yang seharusnya ditanggung oleh kedua generator Pabelokan yang tersisa, masing-masing adalah

$$15,7 + \frac{(15,7 - 4)}{2} = 21,55MW$$

Akibat lepasnya generator PABL-G101A dilakukan pelepasan beban di daerah Selatan sebesar 5,14MW sehingga suplai kedua generator Pabelokan turun menjadi 18MW.

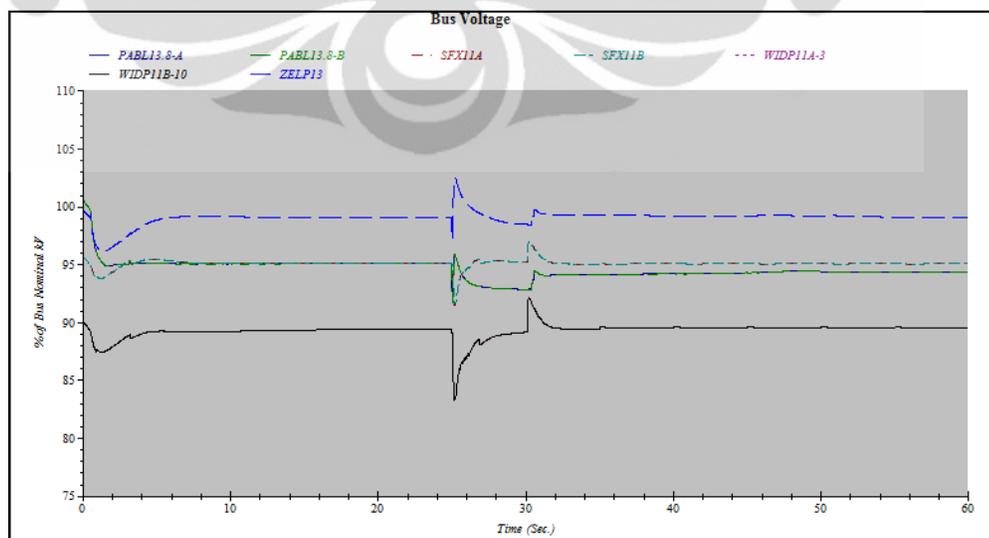
Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa generator di daerah Zelda (G4 dan G9) berusaha menaikkan suplainya untuk memenuhi kebutuhan beban daerah Tengah yang disuplai bersama dengan generator Pabelokan. Sehingga ketika generator Pabelokan mengalami penurunan suplai, generator Zelda akan menaikkan suplainya. Begitu juga sebaliknya. Sedangkan generator di daerah Widuri Proses (Gen14 dan GEN 21) cenderung langsung stabil setelah lepasnya generator PABL-G101A pada detik ke-25.



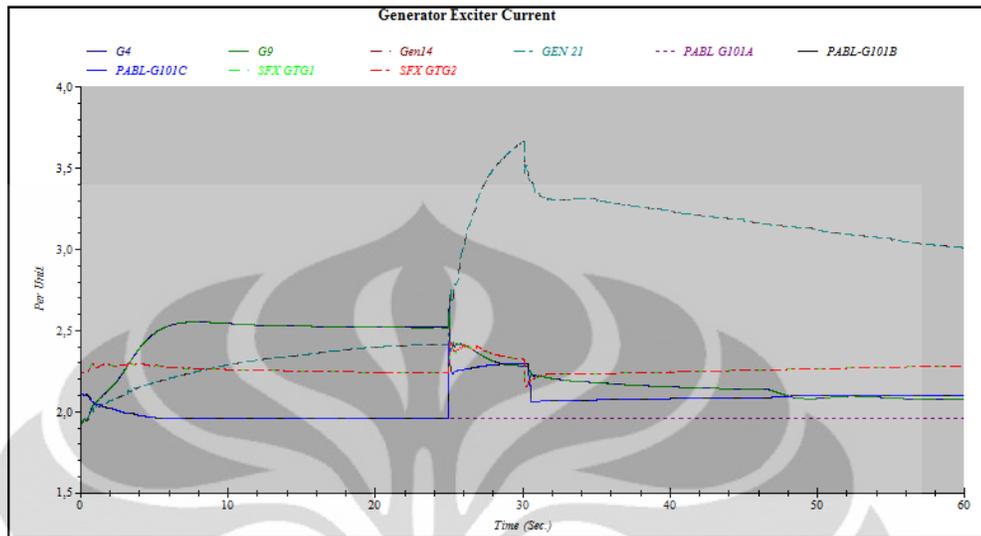
Gambar 4.4 Grafik Daya Aktif Generator pada S1(Sistem tanpa UVR)

Membandingkan Gambar 4.3 ketika skenario 1 diterapkan pada sistem dengan UVR dan Gambar 4.4 yakni pada sistem tanpa UVR, dapat dilihat bahwa tidak adanya pelepasan beban dengan UVR menyebabkan *collapse*-nya kedua generator Pabelokan dan kedua generator Zelda pada detik ke-49,7 (24,7s setelah terjadinya gangguan) karena suplai daya (terutama daya reaktif) tidak dapat memenuhi kebutuhan daya beban.

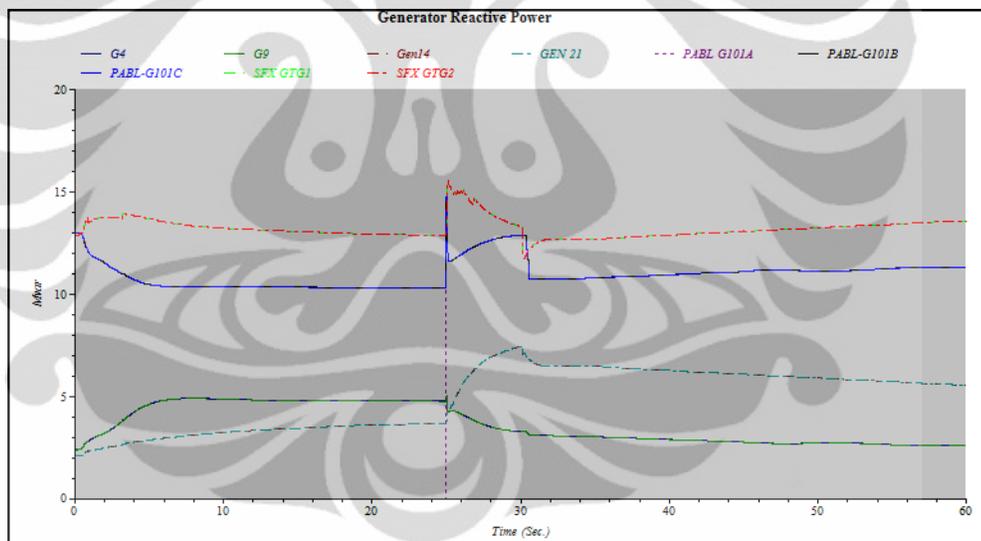
b. Tegangan Bus Generator, Arus Eksitasi (Arus Medan), dan Daya Reaktif



Gambar 4.5 Grafik Tegangan Bus Generator pada S1



Gambar 4.6 Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generatorpada S1



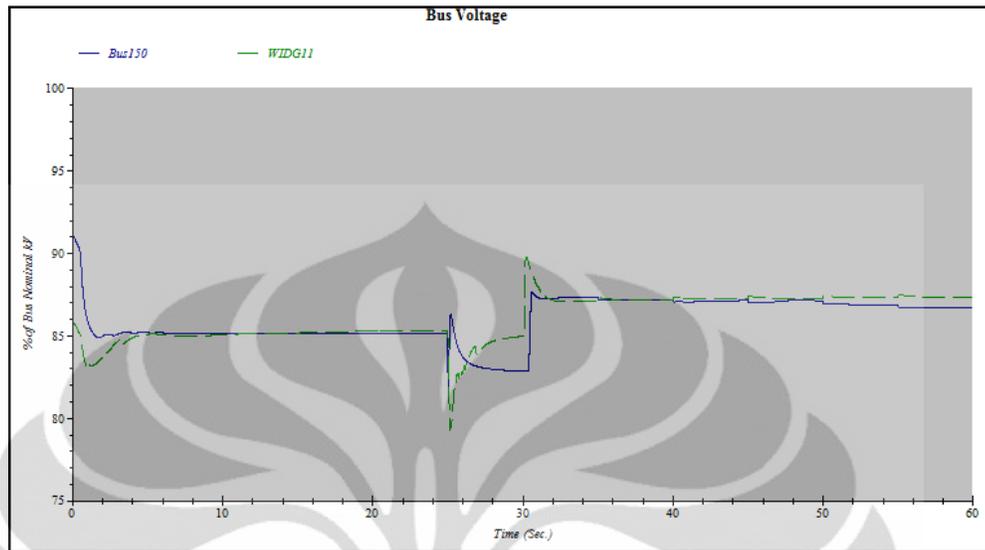
Gambar 4.7 Grafik Daya Reaktif Generatorpada S1

Skenario 1 diterapkan pada detik ke-25 menyebabkan reverse power relay pada jalur Zelda-Karmila beroperasi sehingga secara keseluruhan sistem terbagi menjadi dua daerah, yakni daerah Selatan-Tengah dan daerah Utara. Daerah Selatan-Tengah disuplai oleh tiga generator Pabelokan dan dua generator Zelda, sedangkan daerah Utara disuplai oleh dua generator Seafox dan dua generator Widuri Proses. Hal ini menyebabkan karakteristik tegangan bus generator pada setiap daerah menjadi cenderung sama.

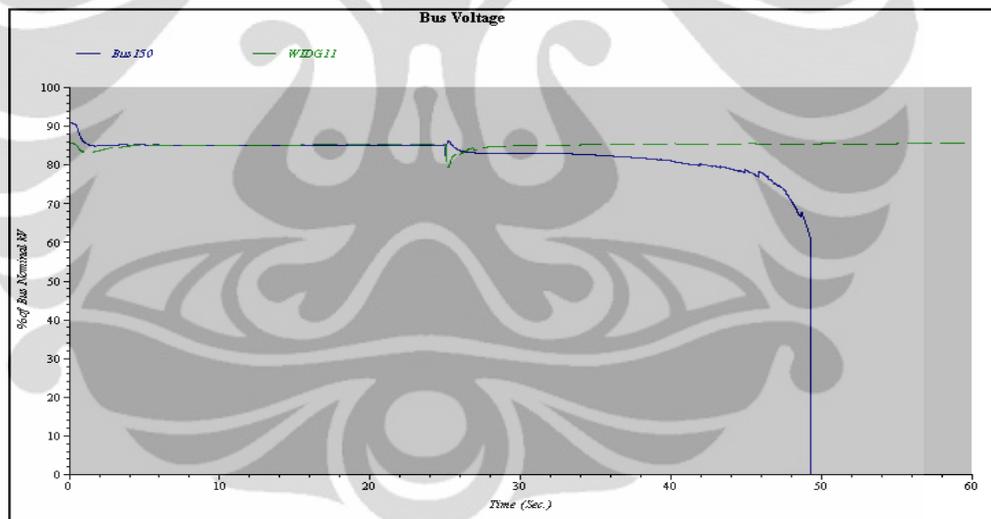
Berdasarkan Gambar 4.5, tegangan bus generator Pabelokan dan Zelda turun secara tajam pada saat terjadi Lepasnya Generator PABL-G101A kemudian naik karena terputusnya suplai daya dari Selatan ke Utara menyebabkan suplai daerah Selatan menjadi kelebihan untuk beberapa saat hingga generator Pabelokan harus menyesuaikan keluaran daya reaktifnya hingga tegangan kembali normal. Sekitar detik ke-30 (5 detik setelah diterapkan gangguan) terjadi pelepasan beban sehingga tegangan bus generator menjadi naik. Gambar 4.6 menunjukkan aksi arus eksitasi dimana ketika tegangan turun, penguat arus medan (*exciter*) akan menghasilkan arus medan (arus eksitasi) yang lebih besar agar suplai daya reaktif bertambah (Gambar 4.7). Bertambahnya suplai daya reaktif dapat memulihkan keadaan tegangan yang turun akibat gangguan. Pada Gambar 4.6, turunnya tegangan saat terjadi gangguan menyebabkan arus eksitasi pada dua generator Pabelokan yang tersisa naik tajam setelah untuk sesaat kemudian turun tetapi masih lebih besar dari arus eksitasi awal. Pelepasan beban yang menyebabkan naiknya tegangan bus generator mengakibatkan suplai arus eksitasi berkurang diikuti oleh suplai daya reaktif (Gambar 4.7), sedangkan arus eksitasi generator Zelda terus menurun setelah terjadi gangguan. Penurunan itu juga diikuti oleh penurunan suplai daya reaktif (Gambar 4.6 dan 4.7). Jika grafik daya reaktif generator Pabelokan dan generator Zelda dibandingkan (Gambar 4.7) maka dapat dilihat bahwa penurunan suplai generator Zelda diikuti oleh kenaikan suplai generator Pabelokan. Sehingga suplai daya keseluruhan terhadap beban dapat dikatakan sama. Begitu juga dengan grafik arus eksitasinya (Gambar 4.6).

Dari Gambar 4.5, tegangan bus generator Seafox dan Widuri Proses turun tajam ketika reverse power relay bekerja karena daerah Utara menjadi kekurangan suplai daya. Hal ini menyebabkan arus eksitasi generator tersebut naik pada detik ke-25 dan turun 5 detik kemudian saat terjadi pelepasan beban di daerah Utara (Gambar 4.6). Grafik daya reaktif yang dihasilkan generator berbanding lurus dengan grafik arus eksitasi (Gambar 4.7). Setelah terjadi gangguan, generator Seafox dan generator Widuri Proses memiliki kecenderungan yang sama dengan generator Pabelokan dan Zelda, yakni suplai keduanya saling melengkapi. Kenaikan salah satu suplai daya reaktif diikuti dengan penurunan suplai generator lainnya.

## c. Tegangan Bus Beban



Gambar 4.8 Grafik Tegangan Bus150 dan bus WIDG11 pada S1



Gambar 4.9 Grafik Tegangan Bus150 dan bus WIDG11 pada S1 (Sistem tanpa UVR)

Memperhatikan Gambar 4.8, Bus150 adalah bus beban CINA1 dan WIDG11 adalah bus beban WIDG2 dan WIDG3 yang lepas karena operasi UVR. Bus150 berada di daerah Selatan dan WIDG11 berada di daerah Utara. Ketika skenario gangguan 1 diterapkan pada detik ke-25, karakteristik grafik tegangan Bus150 sama dengan karakteristik bus generator di daerah Selatan, sedangkan karakteristik grafik WIDG11 sama dengan karakteristik tegangan bus generator di

daerah Utara. Begitu juga saat terjadi pelepasan beban pada beban CINA1, WIDG2, dan WIDG3, kedua grafik tegangan naik kembali.

Bandingkan dengan Gambar 4.9. Jika sistem tidak menggunakan UVR untuk melepas beban ketika terjadi kekurangan suplai daya, maka generator Pabelokan dan Zelda akan *collapse*, seperti yang dijelaskan pada 4.2.1 bagian a (halaman 51-52). Akibatnya seluruh beban di daerah Selatan-Tengah tidak mendapat suplai daya dan tegangan di seluruh bus menjadi *collapse*, seperti grafik tegangan Bus150 pada Gambar 4.9.

#### 4.2.2 S2: Lepasnya Generator SFX GTG1

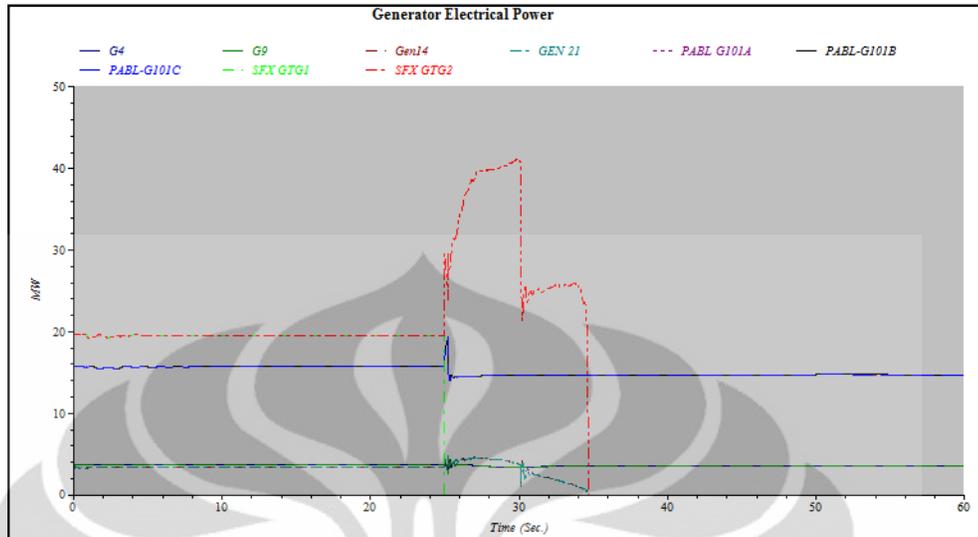
##### a. Daya Aktif Generator

Tabel 4.4 Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S2

Time (sec)	Event	Device ID	Action	Action By
25,000	1	SFX11A-G1	Open	Study Case
25,224	Dir. Pwr Relay	CB206	Open	Directional Power Relay
30,084	Voltage Relay	WIDE1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	INTA6	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	INTA5	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDB3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDB1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDC4	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDC3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDC1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	AIDA3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	AIDA2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDE2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WINA1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WINA3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WINA2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDF1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD5	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD1	Open	Voltage Relay

30,084	Voltage Relay	VITA1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	AIDA1	Open	Voltage Relay
36,273	Voltage Relay	INTB3	Open	Voltage Relay
36,275	Voltage Relay	INTA3	Open	Voltage Relay
36,275	Voltage Relay	INTA2	Open	Voltage Relay
36,275	Voltage Relay	INTA4	Open	Voltage Relay
36,283	Voltage Relay	NEIA1	Open	Voltage Relay
36,283	Voltage Relay	NEIAC1	Open	Voltage Relay
36,300	Voltage Relay	INTA1	Open	Voltage Relay
36,309	Voltage Relay	NEIA4	Open	Voltage Relay
36,332	Voltage Relay	INTB4	Open	Voltage Relay
36,512	Voltage Relay	INTB1	Open	Voltage Relay
36,513	Voltage Relay	INTB2	Open	Voltage Relay
36,659	Voltage Relay	WIDA4	Open	Voltage Relay
36,716	Voltage Relay	INDA2	Open	Voltage Relay
38,079	Voltage Relay	INDA3	Open	Voltage Relay
38,181	Voltage Relay	NEIA3	Open	Voltage Relay
38,273	Voltage Relay	WIDA3	Open	Voltage Relay

38,306	Voltage Relay	WIDA2	Open	Voltage Relay
38,536	Voltage Relay	INDA1	Open	Voltage Relay
38,559	Voltage Relay	NEIAC2	Open	Voltage Relay
38,562	Voltage Relay	WIDB2	Open	Voltage Relay
38,562	Voltage Relay	WIDB4	Open	Voltage Relay
38,584	Voltage Relay	WIDH1	Open	Voltage Relay
38,586	Voltage Relay	WIDC2	Open	Voltage Relay
38,664	Voltage Relay	WIDD3	Open	Voltage Relay
38,665	Voltage Relay	WIDD4	Open	Voltage Relay
38,733	Voltage Relay	WIDH2	Open	Voltage Relay
38,759	Voltage Relay	WIDG1	Open	Voltage Relay
38,782	Voltage Relay	WIDA1	Open	Voltage Relay
39,012	Voltage Relay	WIDE3	Open	Voltage Relay
54,808	Voltage Relay	CINC3	Open	Voltage Relay

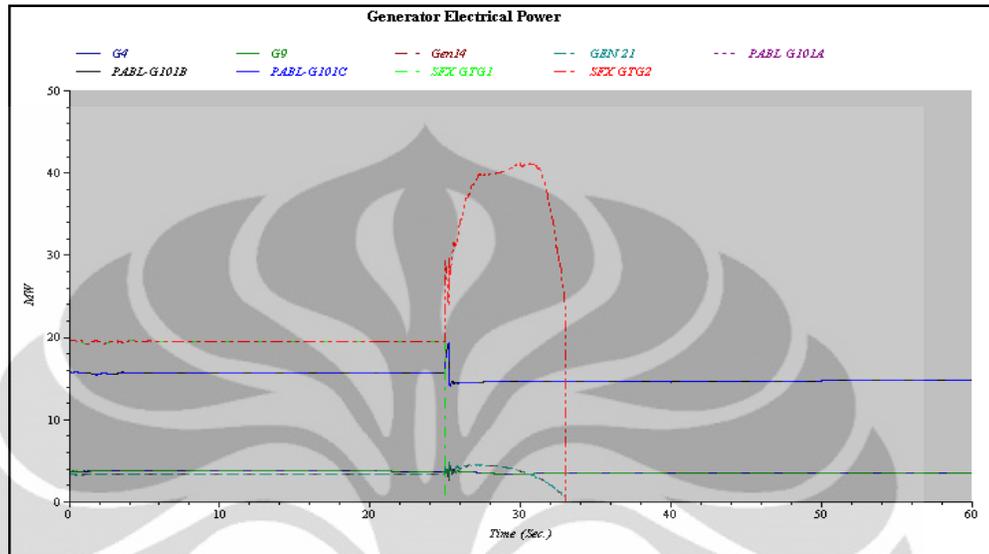


Gambar 4.10 Grafik Daya Aktif Generator pada S2

Berdasarkan Gambar 4.10, ketika skenario gangguan 2 terjadi pada saat  $t=25s$ , rele daya lebih (*over power relay*) bekerja karena daya yang dikirimkan dari daerah Selatan ke daerah Utara lebih dari pengaturan rele, yakni 13MW. Hal ini menyebabkan suplai daya dari generator Pabelokan berkurang dari yang awalnya sekitar 15,7MW menjadi 14MW karena tidak perlu mengirimkan daya sebesar 4MW (tanpa *losses*) dari Pabelokan ke daerah Utara. Generator Zelda (G4 dan G9) juga mengalami penurunan suplai daya aktif, tetapi tidak signifikan.

Setelah lepasnya generator SFX GTG1, generator SFX GTG2 dan dua generator di daerah Widuri Proses (Gen14 dan GEN 21) berusaha memenuhi seluruh kebutuhan daya beban (sumur-sumur). Suplai daya generator SFX GTG2 naik tajam hingga mencapai 41MW dalam waktu 5 detik, tetapi karena tidak dapat menyuplai daya seluruh beban dalam waktu yang lebih lama, akhirnya terjadi pelepasan beban pada detik ke-30 (5 detik setelah terjadi gangguan) hampir setengah dari keseluruhan beban di daerah Utara. Kemudian, karena generator SFX GTG2 diatur untuk keluaran daya aktif 19MW, maka generator tersebut dapat menyuplai daya lebih dari 19MW dalam waktu yang temporer saja. Terjadi pelepasan beban kembali pada detik ke-36 hingga detik ke-38 karena SFX GTG2 dan kedua generator Widuri Proses tidak dapat mempertahankan kemampuan suplai maksimumnya untuk memenuhi kebutuhan daya beban yang tersisa. Ketiga

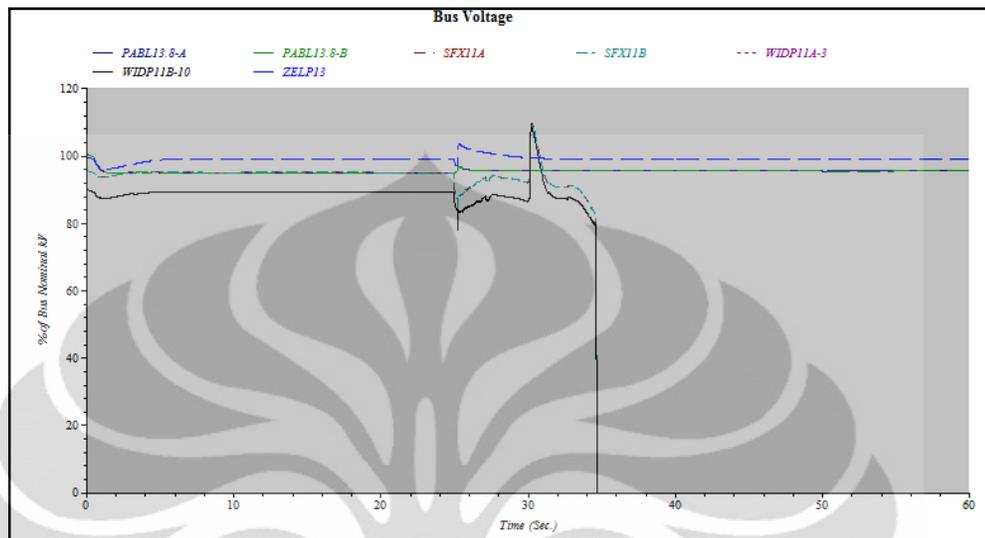
generator di daerah Utara itu pun akhirnya *collapse* pada detik ke-35 (10 detik setelah terjadinya gangguan).



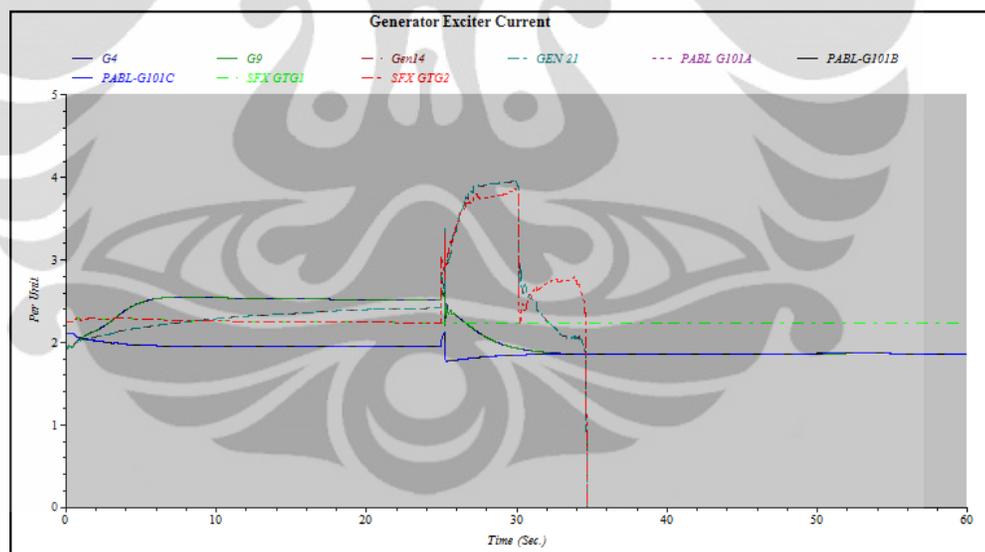
Gambar 4.11 Grafik Daya Aktif Generator pada S2 (Sistem tanpa UVR)

Jika skenario diterapkan pada sistem tanpa UVR, maka saat  $t=25s$ , generator SFX GTG2, Gen14, dan GEN 21 akan berusaha menyuplai daya aktif untuk memenuhi seluruh kebutuhan beban di daerah Utara. Tetapi karena tidak ada skema pelepasan beban dengan parameter tegangan maka akan mempercepat proses *collapse* dari ketiga generator tersebut. Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan generator dari terjadinya gangguan sampai *collapse*nya ketiga generator di daerah Utara adalah sekitar 8 detik, 2 detik lebih cepat dibandingkan dengan sistem yang menggunakan UVR untuk skema pelepasan bebannya.

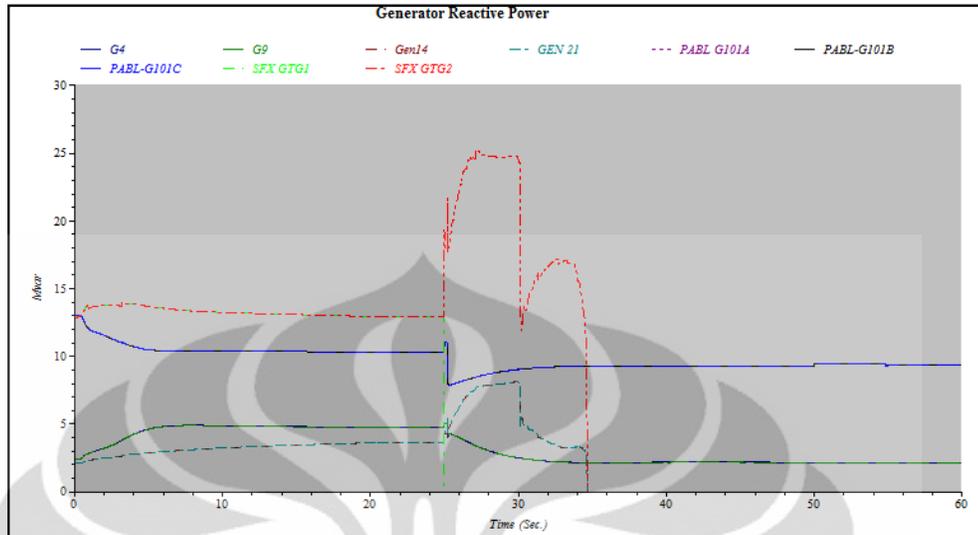
b. Tegangan Bus Generator, Arus Eksitasi (Arus Medan), dan Daya Reaktif Generator



Gambar 4.12 Grafik Tegangan Bus Generator padaS2



Gambar 4.13 Grafik Tegangan Arus Eksitasi (Arus Medan)Generator padaS2



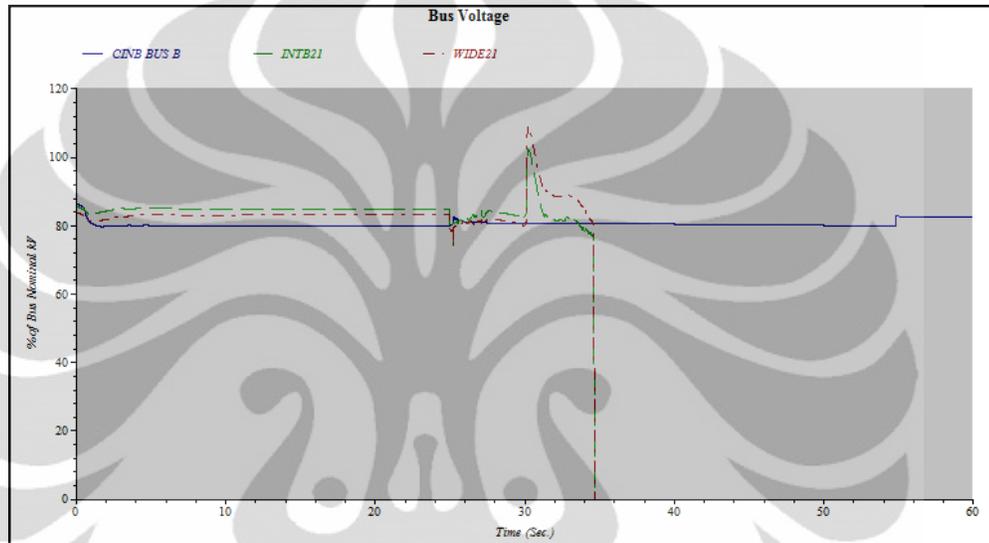
Gambar 4.14 Grafik Daya Reaktif Generator pada S2

Sebagaimana pada Skenario gangguan 1, ketika aliran daya dari daerah Selatan ke daerah Utara menjadi terputus, maka sistem terbagi menjadi dua. Tegangan pada bus generator di daerah Selatan-Tengah (ketiga generator Pabelokan dan kedua generator Zelda) naik sesaat ketika generator SFX GTG1 lepas yang diikuti oleh bekerjanya *over power relay*. Bekerjanya *over power relay* menyebabkan tegangan bus generator di daerah Selatan menjadi naik sebelum kemudian menjadi stabil kembali (Gambar 4.12). Naiknya tegangan tersebut menyebabkan eksiter menurunkan keluaran arus eksitasinya (Gambar 4.13) sehingga daya reaktif keluaran generator juga berkurang (Gambar 4.14) untuk mengembalikan nilai tegangan bus generator pada keadaan normal.

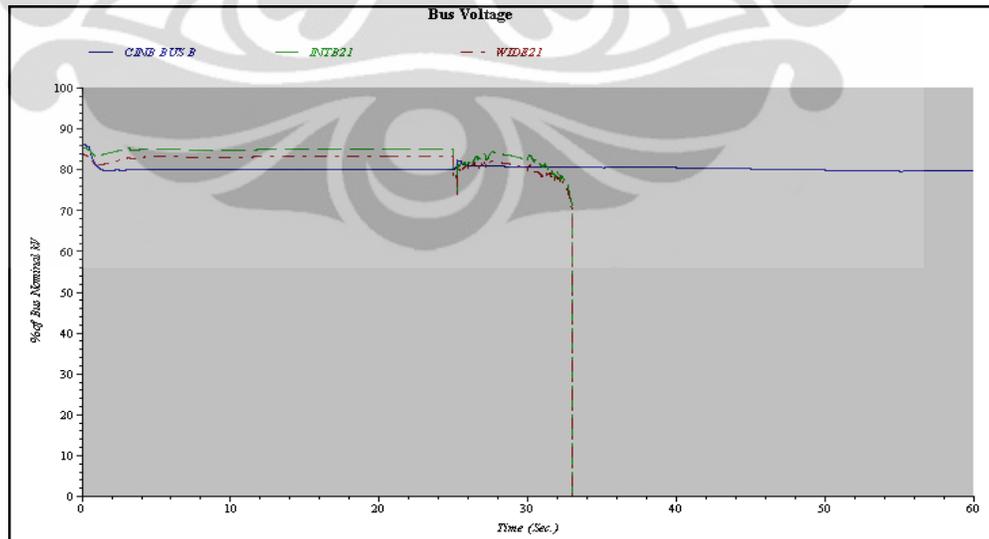
Dari gambar (4.12), ketika skenario gangguan 2 terjadi pada sistem, tegangan bus generator Seafox dan Widuri Proses turun secara signifikan. Kehilangan suplai dari generator SFX GTG1 yang menyebabkan turunnya tegangan bus generator di daerah Utara memberikan umpan balik pada eksiter sehingga arus eksitasi yang dihasilkan hampir mencapai 2 kali arus eksiter pada keadaan normal (Gambar 4.12) agar daya reaktif yang dihasilkan juga mencapai 2 kali daya reaktif normal (Gambar 4.13). Pada detik ke-30 (5 detik setelah gangguan diterapkan), terjadi pelepasan beban dalam jumlah yang cukup besar (sekitar 20MW) dalam waktu yang berdekatan sehingga tegangan bus generator daerah Utara tiba-tiba melonjak (Gambar 4.14), kemudian diikuti oleh penurunan

arus eksitasi dan daya reaktif keluaran generator (Gambar 4.13 dan Gambar 4.14). Karena suplai daya (terutama daya reaktif) belum memenuhi kebutuhan beban yang masih tersisa, tegangan bus menurun kembali secara cepat, kemudian melambat dan akhirnya *collapse* pada detik ke-35 (Gambar 4.12). Begitu juga dengan arus eksitasi dan daya reaktif (Gambar 4.13 dan Gambar 4.14).

### c. Tegangan Bus Beban



Gambar 4.15 Grafik Tegangan CINB BUS B, INTB21, dan WIDE21 padaS2



Gambar 4.16 Grafik Tegangan CINB BUS B, INTB21, dan WIDE21 padaS2 (Sistem tanpa UVR)

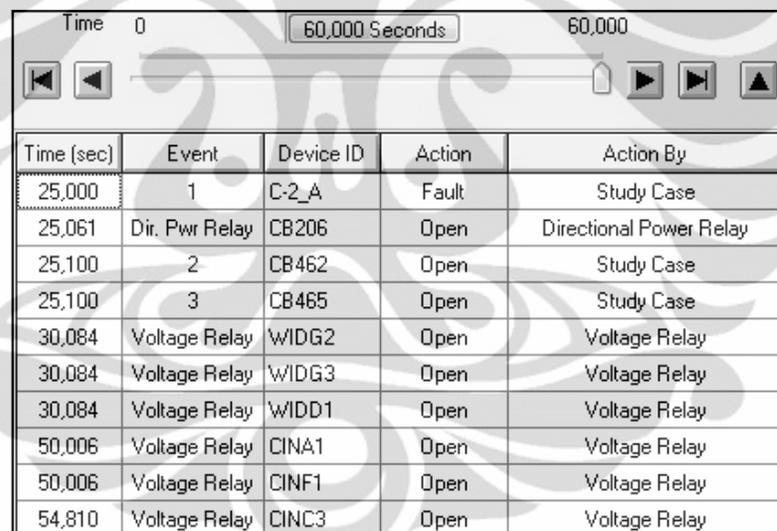
Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa tegangan pada CINB B BUS B naik ketika beban CINC3 lepas pada detik ke-54. Sedangkan tegangan pada INTB21 dan WIDE21 berada pada daerah Utara sehingga memiliki karakteristik yang tidak jauh berbeda dengan karakteristik tegangan pada bus generator di daerah Utara. Tegangan turun saat diberikan gangguan kemudian naik kembali ketika terjadi pelepasan beban, lalu *collapse* dua detik selanjutnya.

Jika dibandingkan dengan Gambar 4.16, tidak adanya pelepasan beban menyebabkan generator di daerah Utara *collapse* lebih cepat 2 detik daripada sistem dengan UVR (Gambar 4.15).

#### 4.2.3 S3: Gangguan Tiga Fasa pada *Line Pabelokan-Zelda (C-2\_A)*

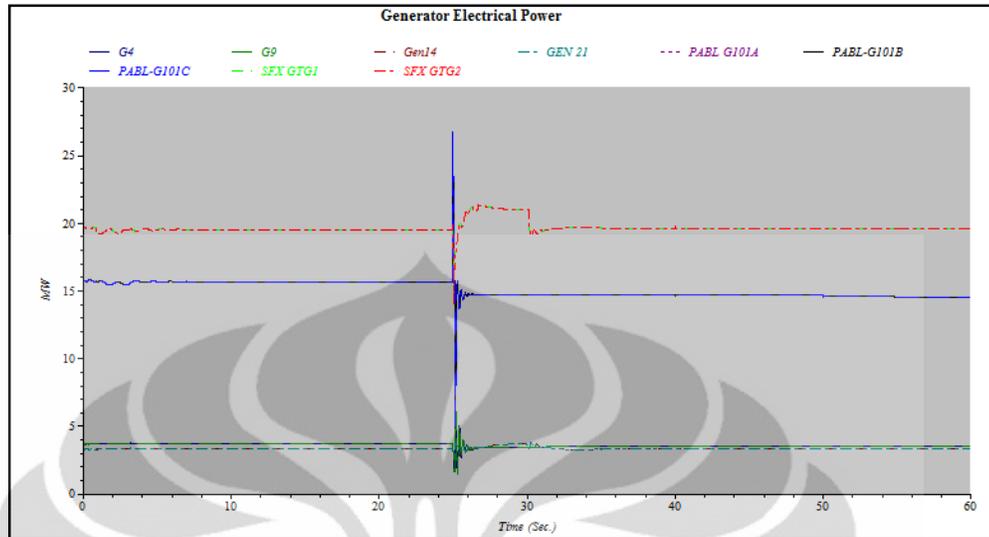
##### a. Daya Aktif Generator

Tabel 4.5 Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S3



Time (sec)	Event	Device ID	Action	Action By
25,000	1	C-2_A	Fault	Study Case
25,061	Dir. Pwr Relay	CB206	Open	Directional Power Relay
25,100	2	CB462	Open	Study Case
25,100	3	CB465	Open	Study Case
30,084	Voltage Relay	WIDG2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD1	Open	Voltage Relay
50,006	Voltage Relay	CINA1	Open	Voltage Relay
50,006	Voltage Relay	CINF1	Open	Voltage Relay
54,810	Voltage Relay	CINC3	Open	Voltage Relay

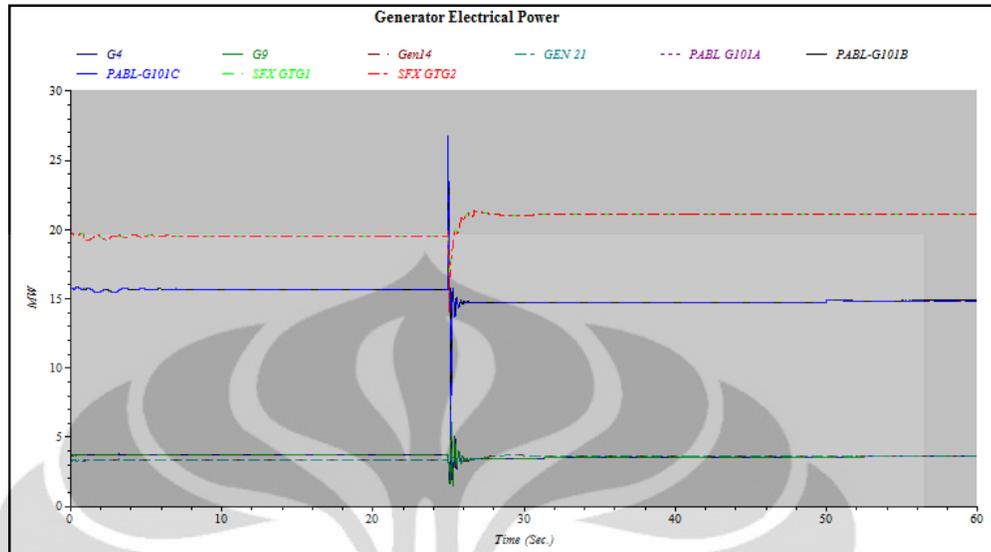
Pada skenario ketiga, terjadinya gangguan tiga fasa tepat di pertengahan (50% panjang kabel) jalur Pabelokan-Zelda. Gangguan terjadi pada detik ke-25. Berdasarkan Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa *reverse power relay* langsung beroperasi 0,061s setelah gangguan akibat adanya arus gangguan menuju titik gangguan (jalur Pabelokan-Zelda) dari daerah Utara. Hal ini mengakibatkan putusnya suplai daya normal dari daerah Selatan ke daerah Utara. Kemudian, CB462 dan CB465 ditrip 0,1 detik (6 *cycles*) setelah terjadi gangguan sehingga gangguan dapat diisolasi dari sistem.



Gambar 4.17 Grafik Daya Aktif Generator pada S3

Terputusnya suplai daya dari daerah Selatan menuju daerah Utara menyebabkan kurangnya suplai daya di daerah Utara sehingga pada detik ke-30,084 (5,084s setelah terjadi gangguan) terjadi pelepasan beban Utara sebesar 3,195MW setelah generator Utara (Generator Seafox dan Widuri Proses) berusaha memenuhi kebutuhan daya seluruh beban di Utara (Gambar 4.17). Dapat dilihat pada Gambar 4.17 bahwa daya aktif yang dihasilkan generator Seafox kembali normal setelah terjadi pelepasan beban, begitu juga dengan generator Widuri Proses (Gen14 dan GEN21).

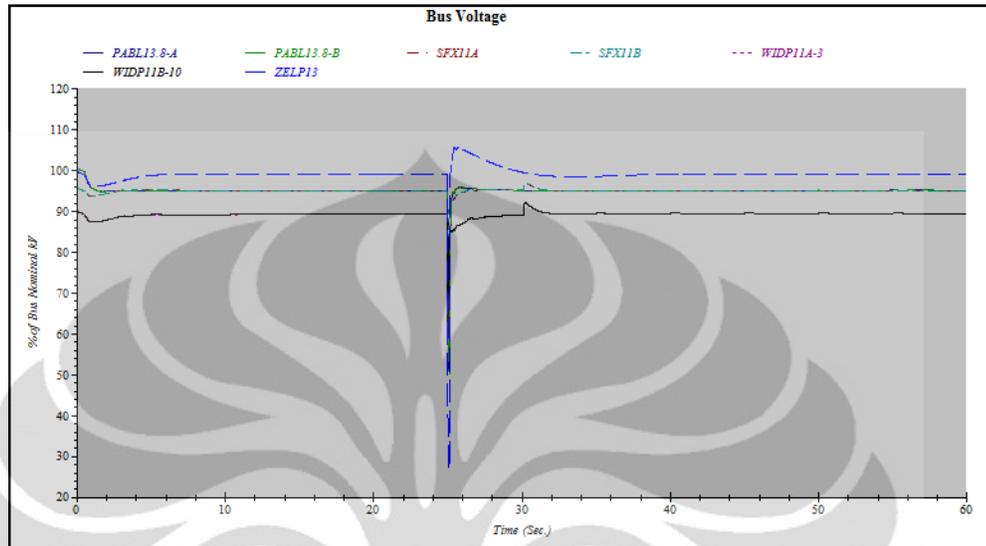
Untuk generator di daerah Selatan (generator Pabelokan dan Zelda) terjadi penurunan suplai daya yang cukup besar akibat putusnya jalur Selatan-Utara dilanjutkan dengan penurunan suplai secara bertahap akibat pelepasan beban di daerah Selatan, yakni sebesar 0,892MW. Ketiga generator Pabelokan masing-masing mengalami penurunan suplai dari 15,7MW menjadi 14,7MW, sedangkan penurunan suplai daya yang terjadi pada generator Zelda (G4 dan G9) tidak signifikan besarnya.



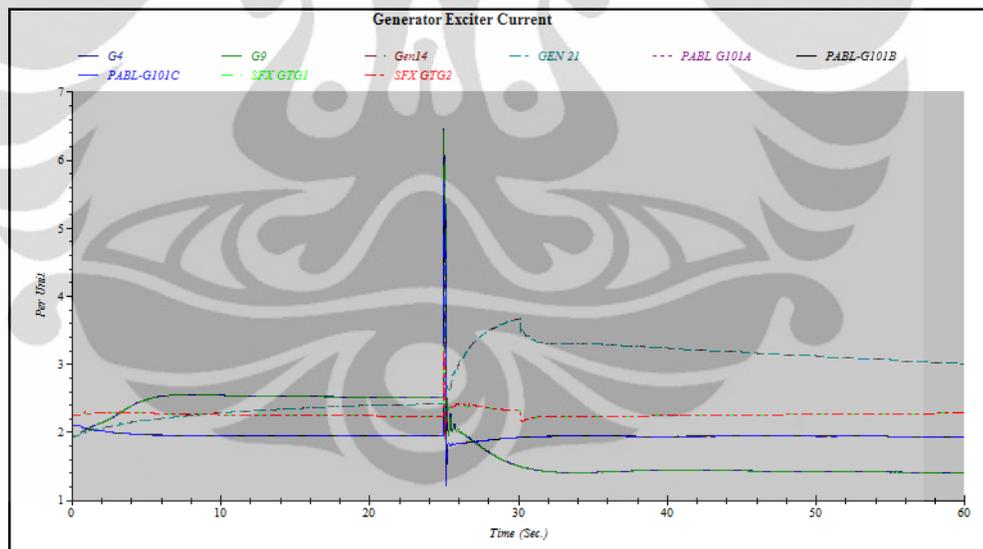
Gambar 4.18 Grafik Daya Aktif Generator pada S3 (Sistem tanpa UVR)

Pada Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa setelah terjadi gangguan pada detik ke-25, terjadi penurunan suplai daya aktif pada generator di daerah Selatan-Tengah sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.17. Sedangkan generator di daerah Utara (generator Seafox dan Widuri Proses) tetap menyuplai seluruh beban di Utara tanpa melakukan pelepasan beban dan melebihi kemampuan suplai maksimum generator (generator Seafox mencapai 21,1 MW) dalam jangka waktu yang lama. Hal ini jika dibiarkan dapat memperparah profil tegangan bus beban sehingga beban (sumur) yang merupakan motor-motor induksi dapat lepas (*stall*) dan menarik arus lebih banyak dari keadaan normal.

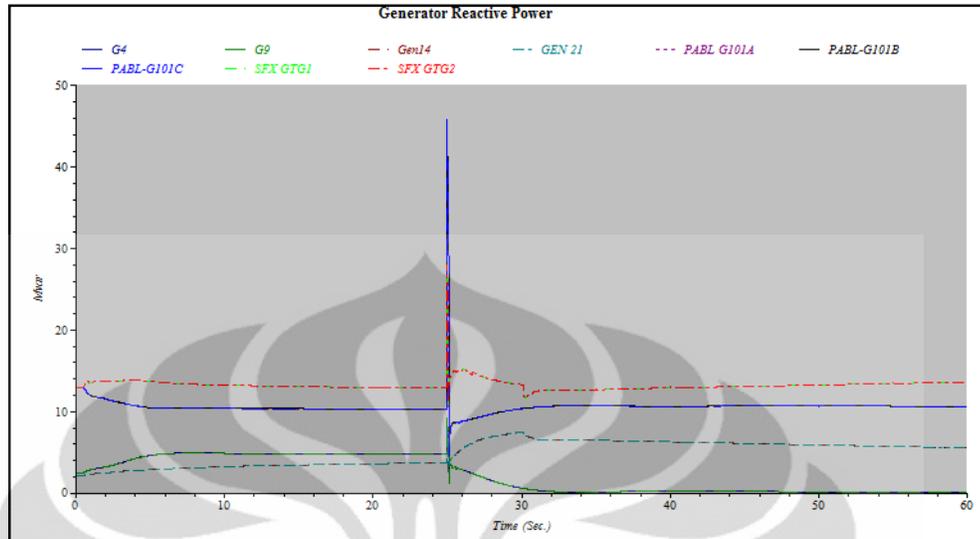
b. Tegangan Bus Generator, Arus Eksitasi (Arus Medan), dan Daya Reaktif Generator



Gambar 4.19 Grafik Tegangan Bus Generator padaS3



Gambar 4.20 Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator padaS3



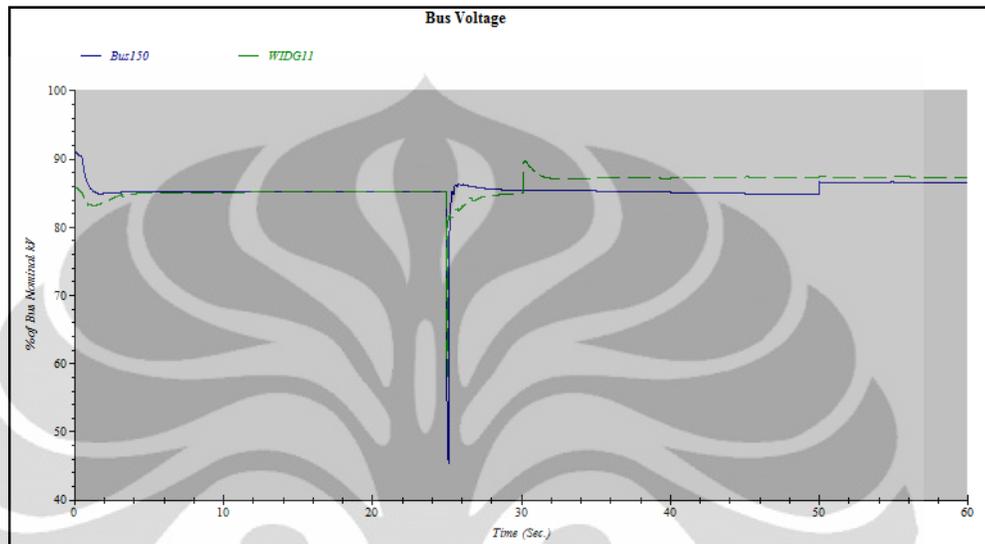
Gambar 4.21 Grafik Daya Reaktif Generator padaS3

Gambar 4.19 menunjukkan profil tegangan bus generator sebelum dan setelah diterapkan skenario gangguan ke-3 pada sistem. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa seluruh tegangan bus menurun tajam ketika terjadi gangguan tiga fasa pada jalur Pabelokan-Zelda, terutama tegangan pada bus generator Zelda (G4 dan G9). Hal ini disebabkan oleh jarak yang jalur Pabelokan-Zelda sangat dekat dengan generator Zelda sehingga pengaruh gangguan menjadi semakin besar. 0.1 detik setelah gangguan terjadi, CB462 dan CB465 diatur agar trip. Hal ini menyebabkan gangguan terisolasi terhadap sistem sehingga aliran daya dan tegangan sistem perlahan kembali normal. Bahkan tegangan bus generator G4 dan G9 naik sesaat dari 95% hingga 105% tegangan nominal bus akibat tripnya CB462 dan CB465, kemudian kembali seperti pada saat operasi normal.

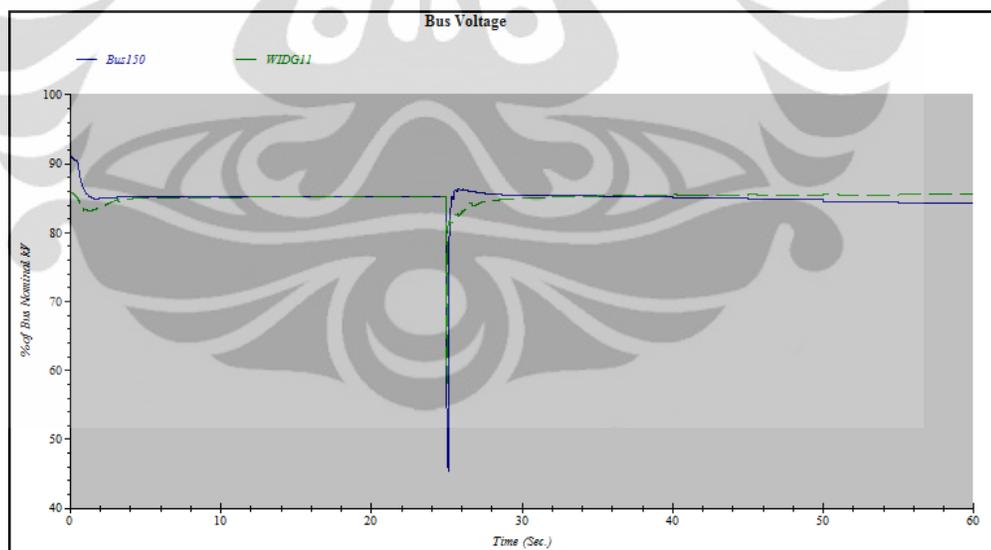
Pada Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa eksiter seluruh generator menghasilkan arus eksitasi (arus medan) jauh lebih besar ketika skenario gangguan 3 diterapkan pada sistem hingga CB462 dan CB465 diputus (*trip*). Tripnya kedua CB tersebut menyebabkan arus eksitasi yang dihasilkan turun tajam. Kemudian di daerah Selatan-Tengah, arus eksitasi generator Pabelokan perlahan naik, sedangkan arus eksitasi generator Zelda menurun. Sedangkan pada daerah Utara, arus eksitasi pada generator Seafox cenderung naik ketika arus eksitasi generator di Widuri Proses turun. Generator pada daerah yang sama menanggung beban yang sama sehingga suplai dayanya saling melengkapi.

Gambar Grafik Daya Reaktif Generator pada S3 memiliki karakteristik yang sama dengan Gambar Grafik Arus Eksitasi Generator pada S3.

c. Tegangan Bus Beban



Gambar 4.22 Grafik Tegangan Bus150 dan WIDG11 padaS3



Gambar 4.23 Grafik Tegangan Bus150 dan WIDG11 padaS3 (Sistem tanpa UVR)

Gambar 4.22 menunjukkan profil tegangan Bus150 dan WIDG11 pada sistem dengan UVR. Bus WIDG11 melepas bebannya pada detik ke-30,084 (5,084 detik setelah gangguan) sehingga tegangan bus naik hingga 87% dari tegangan nominal bus. Sedangkan Bus150 melepas bebannya (CINA1) pada detik ke-50,006

karena penurunan tegangan perlahan akibat suplai daya reaktif yang juga berkurang perlahan. Gambar 4.23 menunjukkan profil tegangan bus beban pada sistem tanpa UVR. Jika dibandingkan dengan Gambar 4.22, seharusnya beban yang terhubung pada bus WIDG11 lepas pada detik ke-30,084 (5,084 detik setelah gangguan sebagaimana pengaturan UVR). Tetapi Gambar 4.22 menunjukkan tegangan bus WIDG11 dapat kembali mencapai nilai di atas 85% tegangan nominal bus pada detik ke-30,041. Dengan memperpanjang waktu tunda rele dimungkinkan sistem dapat mempertahankan beban yang terhubung langsung dengan bus WIDG11. Sedangkan tegangan Bus150 juga tidak melepaskan beban pada detik ke-50 sehingga tegangan semakin turun karena kurangnya suplai daya reaktif terhadap bus tersebut.

#### 4.2.4 S4: Gangguan Tiga Fasa pada *Line Pabelokan-Krisna (C-3\_A)*

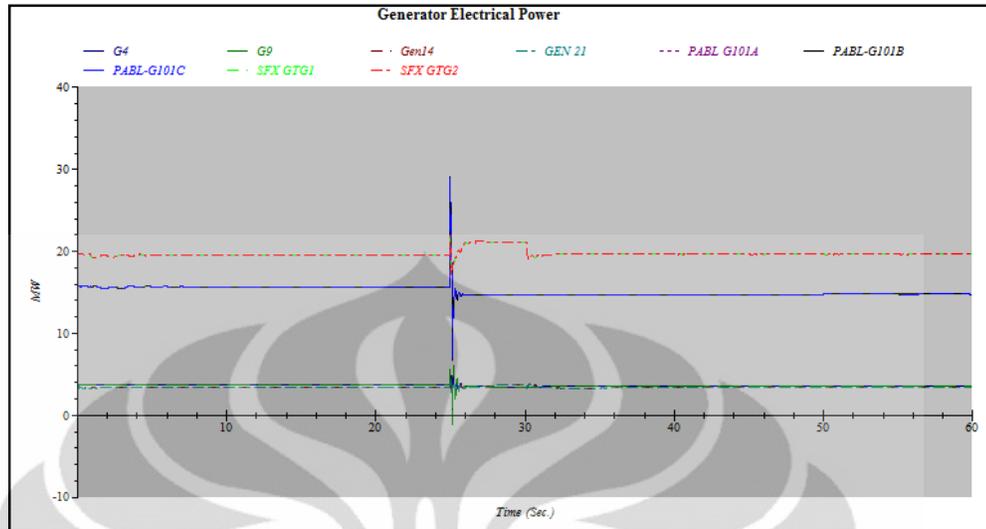
##### a. Daya Aktif Generator

Tabel 4.6 Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S4

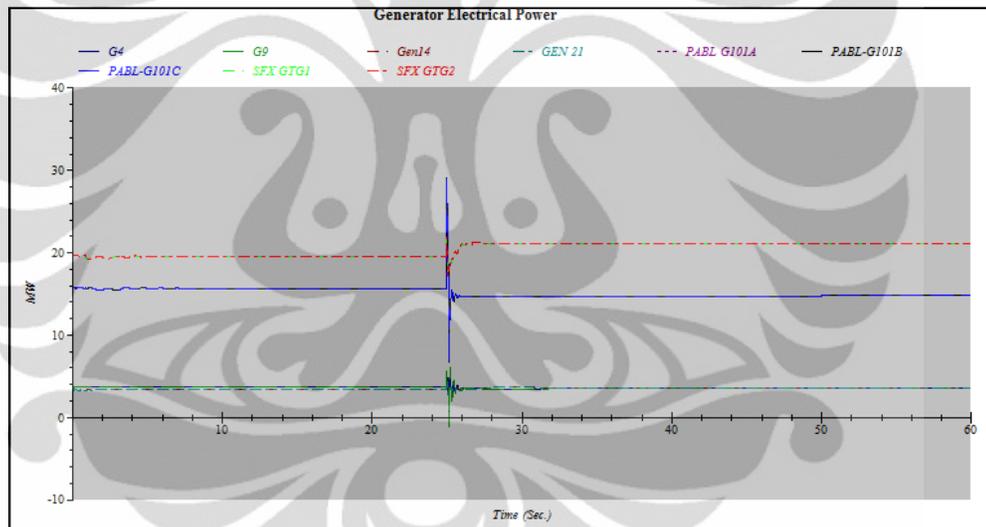


Time (sec)	Event	Device ID	Action	Action By
25,000	1	C-3_A	Fault	Study Case
25,061	Dir. Pwr Relay	CB206	Open	Directional Power Relay
25,100	2	CB463	Open	Study Case
25,100	3	CB464	Open	Study Case
30,084	Voltage Relay	WIDG2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD1	Open	Voltage Relay
55,008	Voltage Relay	CINA1	Open	Voltage Relay
59,810	Voltage Relay	CINC3	Open	Voltage Relay

Skenario gangguan 4 adalah menerapkan gangguan tiga fasa pada jalur transmisi Pabelokan Krisna yang berjarak 130.000ft. Gangguan diterapkan pada 50% panjang kabel/saluran. Dari Tabel 4.6, 0,61 detik setelah gangguan terjadi, *reverse power relay* bekerja karena ada arus gangguan dari daerah Utara menuju Selatan melalui jalur Zelda-Karmila. 0,1 detik kemudian (6 *cycles*), CB463 dan CB464 diatur supaya trip. Hal ini dilakukan untuk mengisolasi jalur Pabelokan-Krisna yang mengalami gangguan, seperti pada Skenario gangguan 3.



Gambar 4.24 Grafik Daya Aktif Generator padaS4

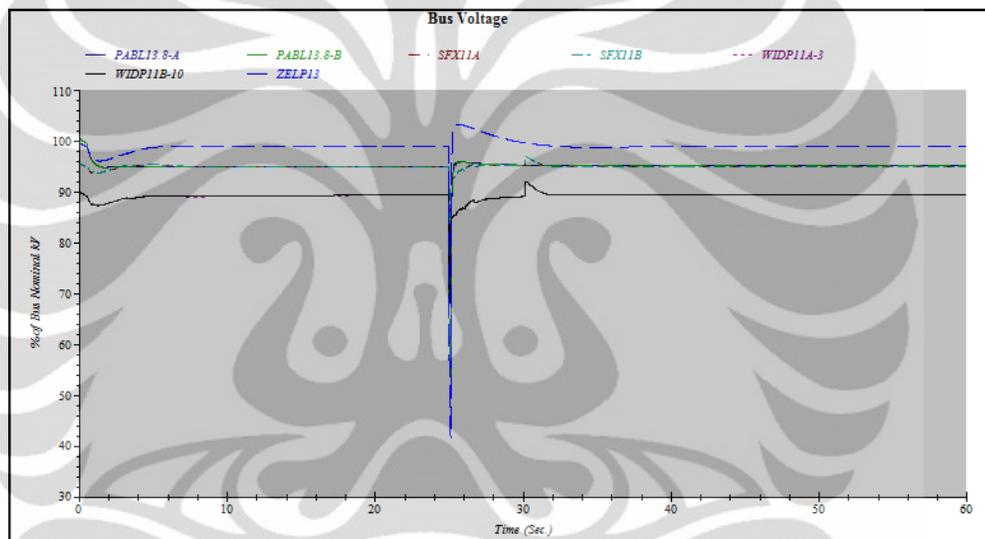


Gambar 4.25 Grafik Daya Aktif Generator padaS4 (Sistem tanpa UVR)

Terputusnya suplai daya dari daerah Selatan menuju daerah Utara menyebabkan kurangnya suplai daya di daerah Utara sehingga pada detik ke-30,084 (5,084 detik setelah gangguan) terjadi pelepasan beban Utara sebesar 3,195MW setelah generator Utara (Generator Seafox dan Widuri Proses) berusaha memenuhi kebutuhan daya seluruh beban di Utara (Gambar 4.24). Dapat dilihat pada Grafik Daya Aktif Generator pada S4 bahwa daya aktif yang dihasilkan generator Seafox kembali normal setelah terjadi pelepasan beban.

Untuk generator Pabelokan terjadi penurunan suplai daya akibat putusnya jalur Selatan-Utara dilanjutkan dengan penurunan suplai yang tidak signifikan secara bertahap akibat pelepasan beban di daerah Selatan sebesar 0,521MW. Ketiga generator Pabelokan masing-masing mengalami penurunan suplai dari 15,7MW menjadi 14,7MW dan generator Zelda dapat kembali ke kondisi awal setelah mendapat gangguan. Sedangkan Gambar 4.25 menunjukkan karakteristik yang sama dengan Gambar 4.18.

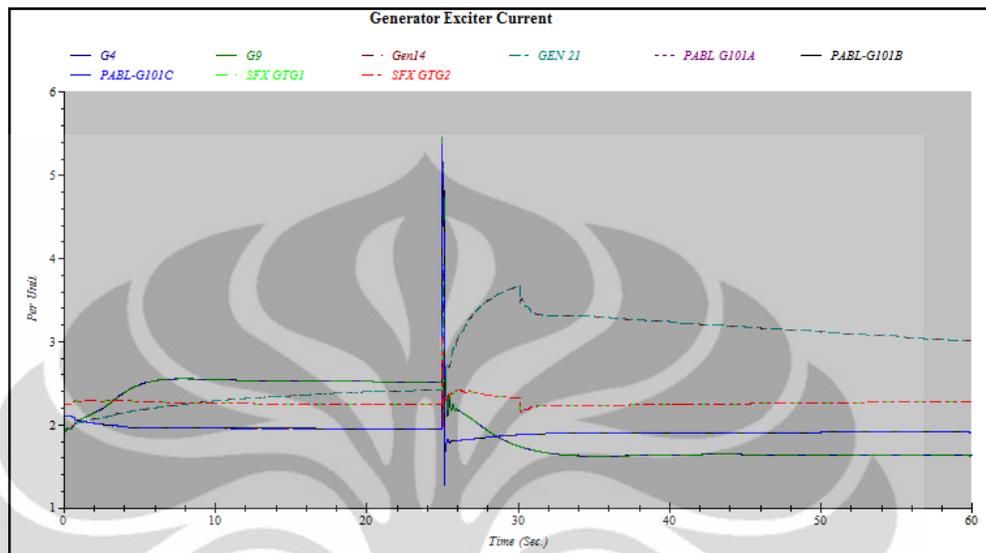
b. Tegangan Bus Generator, Arus Eksitasi (Arus Medan), dan Daya Reaktif Generator



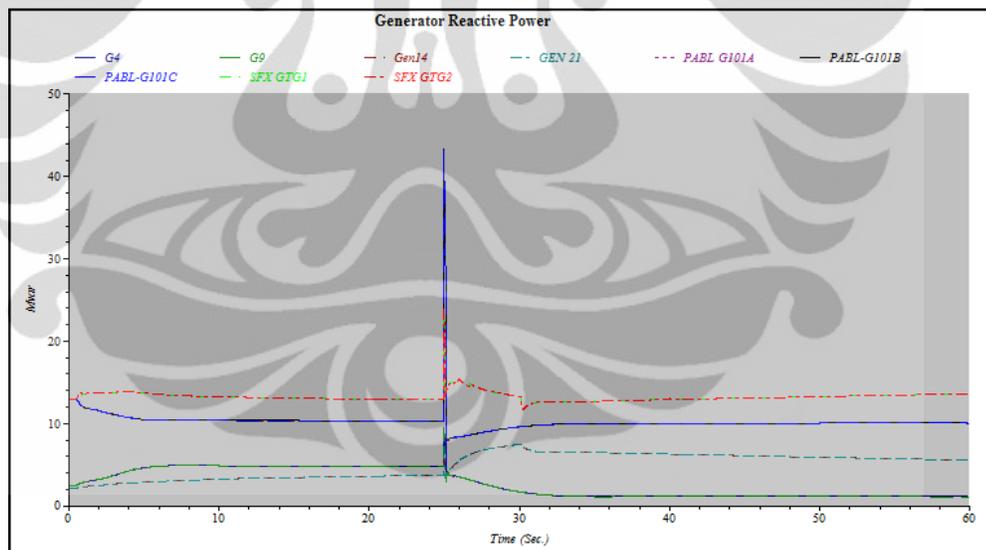
Gambar 4.26 Grafik Tegangan Bus Generator padaS4

Gambar 4.26 menunjukkan profil tegangan bus generator sebelum dan setelah diterapkan skenario gangguan ke-4 pada sistem. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa seluruh tegangan bus menurun tajam ketika terjadi gangguan tiga fasa pada jalur Pabelokan-Krisna, terutama tegangan pada bus generator Zelda (G4 dan G9). Hal ini disebabkan oleh jarak yang jalur Pabelokan-Krisna dekat dengan generator Zelda sehingga pengaruh gangguan menjadi semakin besar. 0.1 detik setelah gangguan diterapkan, CB463 dan CB464 diatur agar trip. Hal ini menyebabkan gangguan terisolasi terhadap sistem sehingga aliran daya dan tegangan sistem perlahan kembali normal. Bahkan tegangan bus generator G4 dan G9 naik sesaat dari 95% hingga 105% tegangan nominal bus

akibat tripnya CB462 dan CB465, kemudian kembali seperti pada saat operasi normal.



Gambar 4.27 Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator padaS4

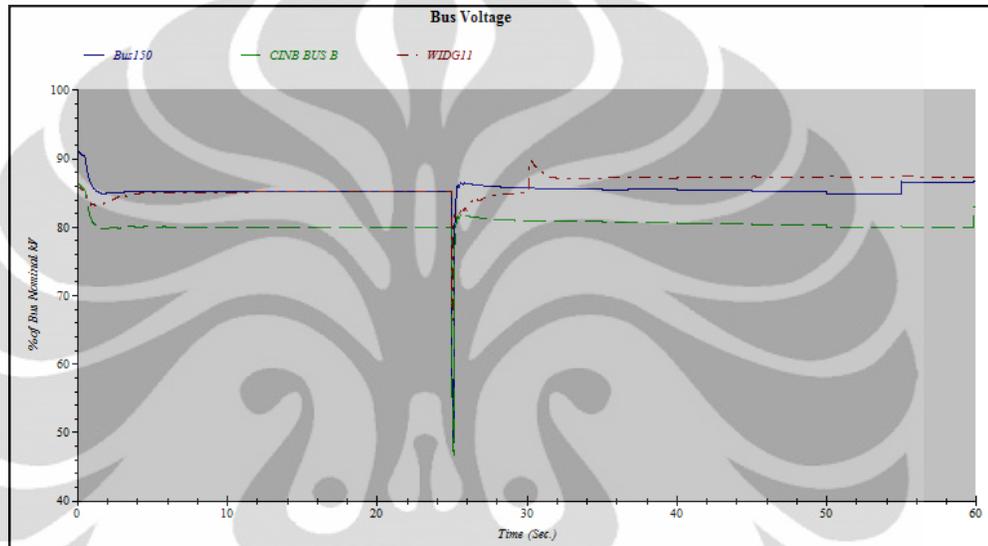


Gambar 4.28 Grafik Daya Reaktif Generator padaS4

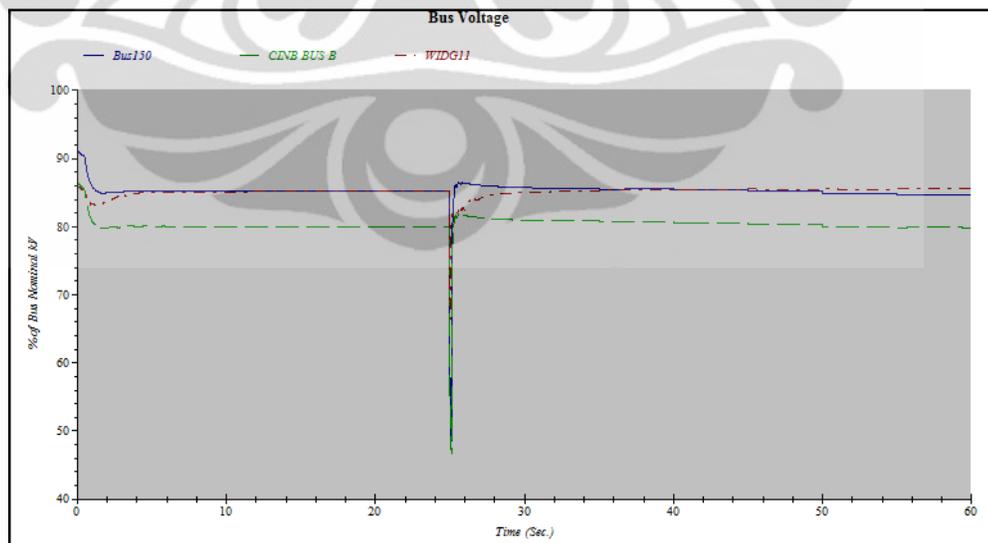
Dari Gambar 4.27 dapat dilihat bahwa eksiter seluruh generator menghasilkan arus eksitasi (arus medan) jauh lebih besar ketika skenario gangguan 4 diterapkan pada sistem hingga CB463 dan CB464 diputus (*trip*). Tripnya kedua CB tersebut menyebabkan arus eksitasi yang dihasilkan turun tajam. Kemudian di daerah Selatan-Tengah, arus eksitasi generator Pabelokan perlahan naik, sedangkan arus eksitasi generator Zelda menurun. Sedangkan pada

daerah Utara, arus eksitasi pada generator Seafox naik ketika arus eksitasi generator di Widuri Proses turun. Generator pada daerah yang sama menanggung beban yang sama sehingga suplai dayanya saling melengkapi. Gambar 4.28 memiliki karakteristik yang sama dengan Gambar Grafik Arus Eksitasi Generator pada S4.

### c. Tegangan Bus Beban



Gambar 4.29 Grafik Tegangan Bus150, CINB BUS B, dan WIDG11 padaS4



Gambar 4.30 Grafik Tegangan Bus150, CINB BUS B, dan WIDG11 padaS4 (Sistem tanpa UVR)

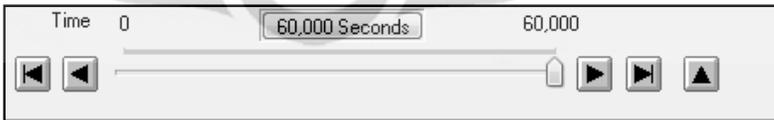
Gambar 4.29 menunjukkan profil tegangan beberapa bus beban yang lepas karena operasi UVR ketika gangguan diterapkan pada sistem, antara lain Bus150, CINB BUS B, dan WIDG11. Beban yang terhubung dengan bus WIDG11 lepas pada detik ke-5 setelah diterapkan gangguan. Hal ini menyebabkan tegangan bus beban naik sesaat kemudian perlahan kembali pada kondisi normal. Sedangkan tegangan Bus150 dan CINB BUS B lepas karena terjadi penurunan suplai daya reaktif dari generator di daerah Selatan-Tengah secara perlahan. Beban yang terhubung dengan Bus150, yakni CINA1, lepas pada detik ke-55,008 (30,008 detik setelah gangguan), namun beban yang terhubung langsung ke CINB BUS B, yaitu CINC3 lepas pada detik ke-59,81 (34,81 detik setelah gangguan) karena tegangan busnya berada di bawah 80% tegangan bus nominal selama lebih dari 4,8 detik sesuai dengan pengaturan untuk UVR pada bus tersebut.

Memperhatikan Gambar 4.30, tegangan bus WIDG11 dapat kembali mencapai nilai di atas 85% tegangan nominal bus pada detik ke-31. Dengan memperpanjang waktu tunda rele dimungkinkan sistem dapat mempertahankan beban yang terhubung langsung dengan bus WIDG11. Di sisi lain, Bus150 dan CINB BUS B juga tidak melepaskan beban pada detik ke-55,008 (30,008 detik setelah gangguan) dan ke-59,81 (34,81 detik setelah gangguan) sehingga tegangan semakin turun karena kurangnya suplai daya reaktif terhadap bus tersebut.

#### 4.2.5 S5: Gangguan Tiga Fasa pada *LineZelda-Karmila (C-18)*

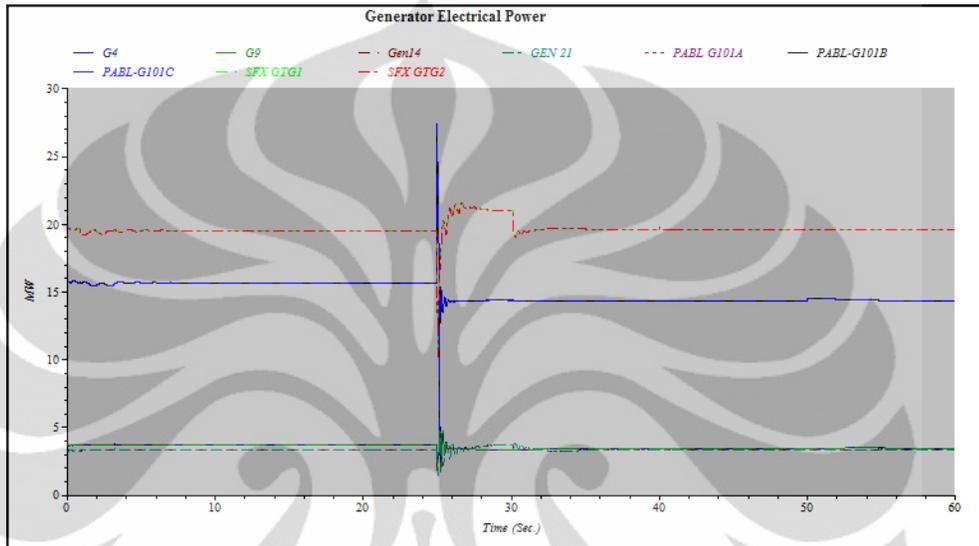
##### a. Daya Aktif Generator

Tabel 4.7 Daftar Aksi Stabilitas Transien pada S5

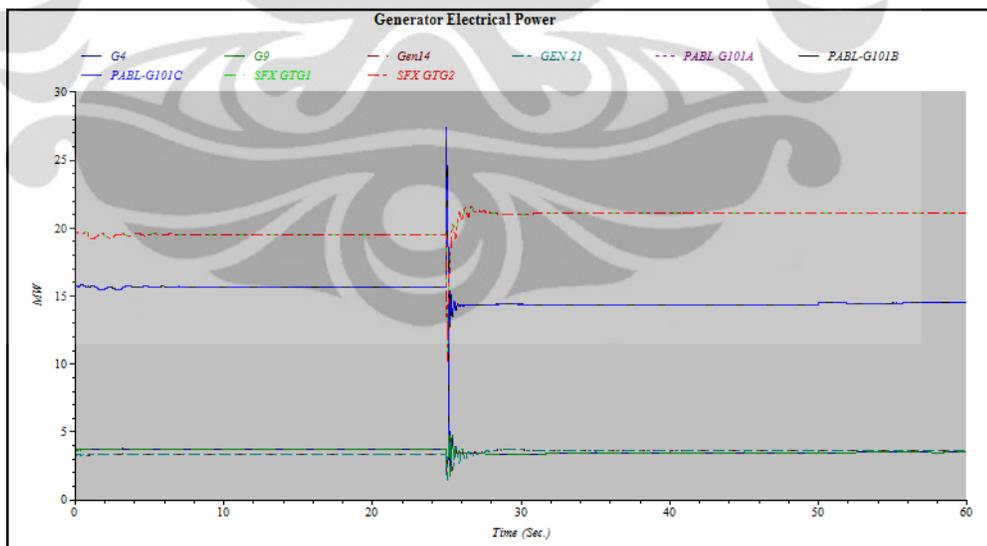


Time [sec]	Event	Device ID	Action	Action By
25,000	1	C-18	Fault	Study Case
25,061	Dir. Pwr Relay	CB206	Open	Directional Power Relay
25,100	2	CB203	Open	Study Case
25,100	3	CB469	Open	Study Case
30,084	Voltage Relay	WIDG2	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDG3	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	WIDD1	Open	Voltage Relay
30,084	Voltage Relay	KARA1	Open	Voltage Relay
54,808	Voltage Relay	CINC3	Open	Voltage Relay

Skenario gangguan 5 berupa gangguan tiga fasa pada jalur Zelda-Karmila yang diterapkan pada sistem saat detik ke-25. Seperti pada Skenario 3 dan Skenario 4, setelah gangguan diterapkan pada sistem, *reverse power relay* beroperasi akibat adanya arus gangguan menuju jalur Zelda-Karmila 0,061 detik kemudian.



Gambar 4.31 Grafik Daya Aktif Generator padaS5



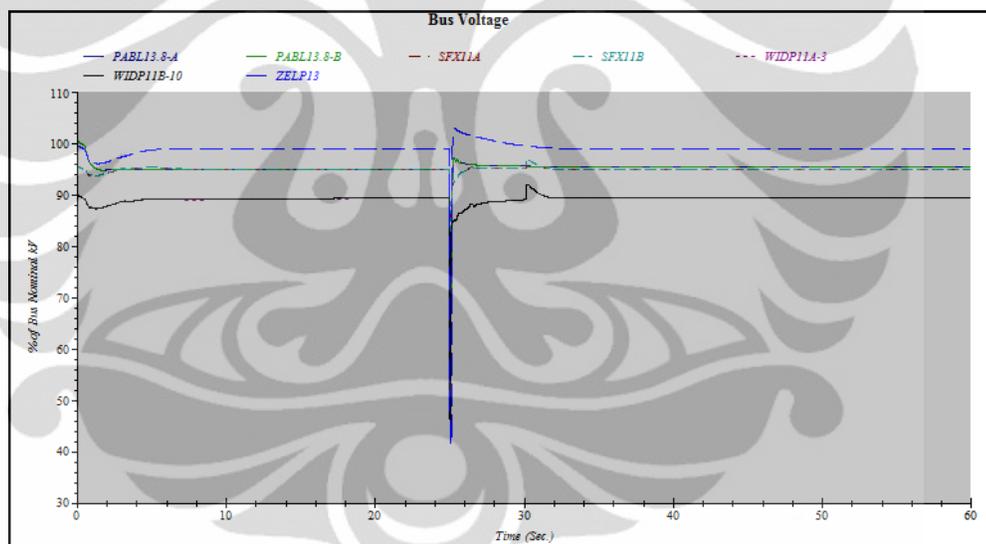
Gambar 4.32 Grafik Daya Aktif Generator padaS5 (Sistem tanpa UVR)

Terputusnya suplai daya dari daerah Selatan menuju daerah Utara menyebabkan kurangnya suplai daya di daerah Utara sehingga pada detik ke-30,084 (5,084 detik setelah gangguan) terjadi pelepasan beban Utara sebesar

3,195MW (Gambar 4.31).Dapat dilihat pada Grafik Daya Aktif Generator pada S5 bahwa daya aktif yang dihasilkan generator Seafox kembali normal setelah terjadi pelepasan beban.

Untuk generator Pabelokan terjadi penurunan suplai daya akibat putusnya jalur Selatan-Utara dilanjutkan dengan penurunan suplai yang tidak signifikan secara bertahap akibat pelepasan beban di daerah Selatan-Tengah sebesar 0,983MW.Ketiga generator Pabelokan masing-masing mengalami penurunan suplai dari 15,7MW menjadi 14,3MW dan generator Zelda dapat segera kembali ke kondisi awal setelah mendapat gangguan. Gambar 4.32 menunjukkan karakteristik yang sama dengan Gambar 4.18 atau Gambar 4.25.

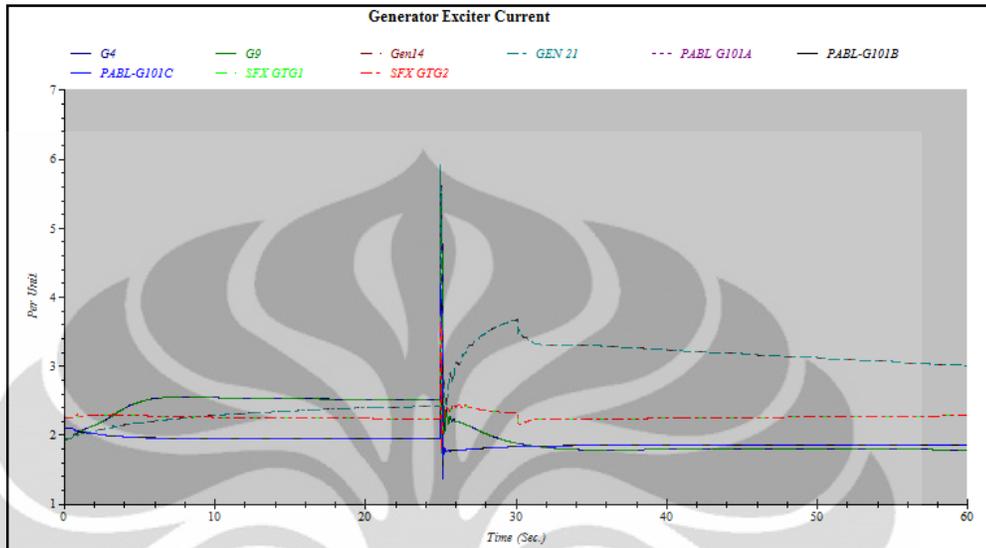
b. Tegangan Bus Generator, Arus Eksitasi (Arus Medan), dan Daya Reaktif Generator



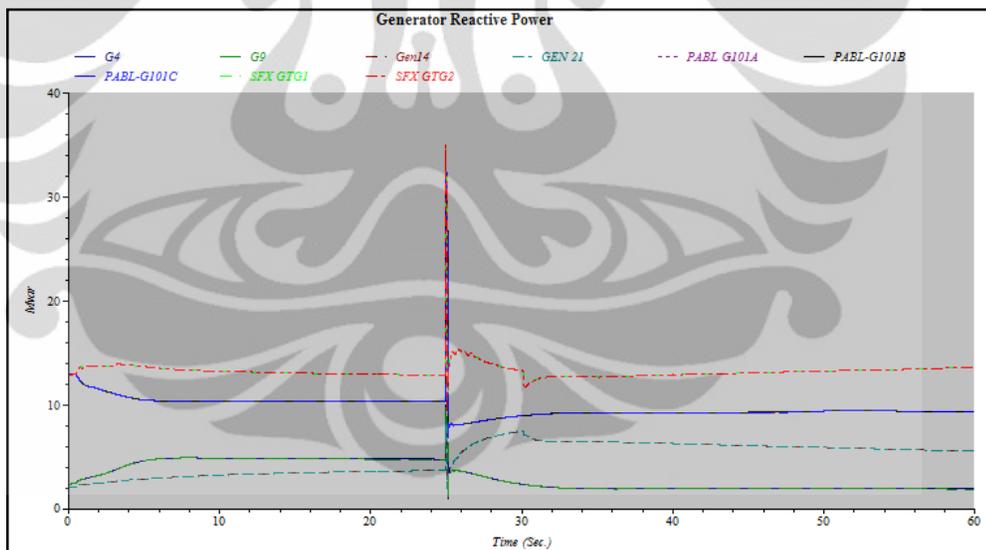
Gambar 4.33 Grafik Tegangan Bus Generator padaS5

Gambar 4.33 menunjukkan profil tegangan bus generator sebelum dan setelah diterapkan Skenario gangguan 5 pada sistem.Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa seluruh tegangan bus menurun tajam ketika terjadi gangguan tiga fasa pada jalur Pabelokan-Krisna, terutama tegangan pada bus generator Zelda (G4 dan G9).Hal ini disebabkan oleh jarak yang jalur Zelda-Karmila dekat dengan generator Zelda sehingga pengaruh gangguan menjadi semakin besar.0.1 detik setelah gangguan diterapkan, CB469 dan CB203 diatur agar trip.Hal ini

menyebabkan gangguan terisolasi terhadap sistem sehingga aliran daya dan tegangan sistem perlahan kembali normal.



Gambar 4.34 Grafik Arus Eksitasi (Arus Medan) Generator padaS5

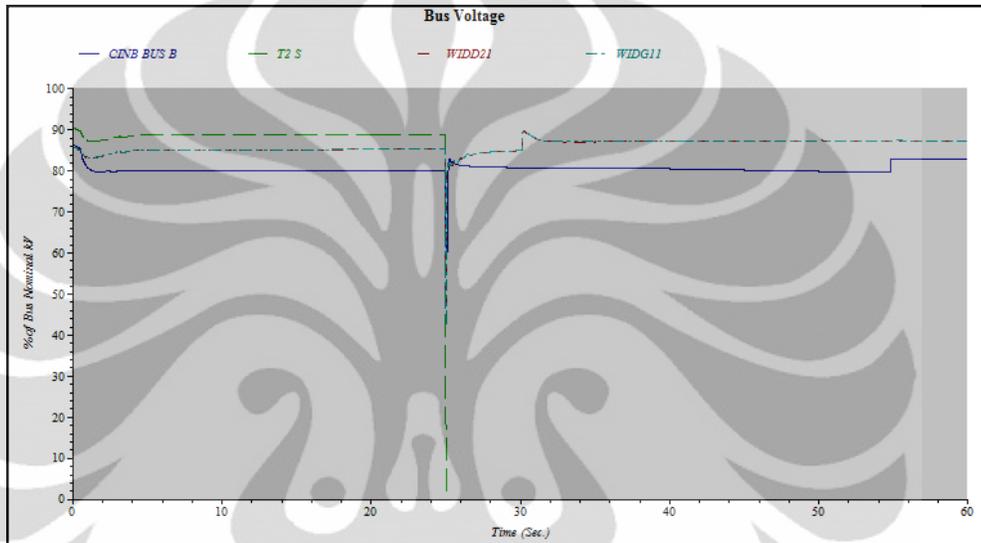


Gambar 4.35 Grafik Daya Reaktif Generator padaS5

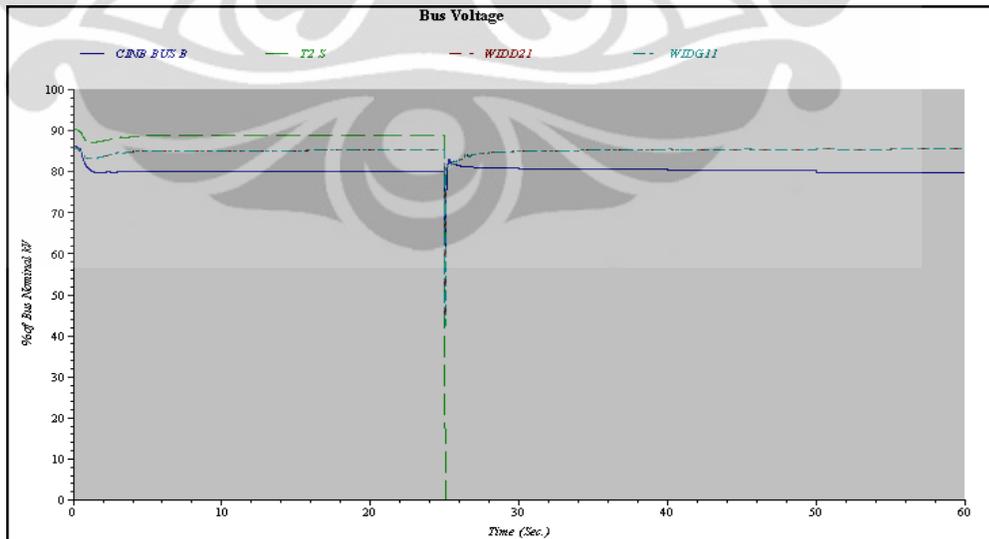
Dari Gambar 4.34 dapat dilihat bahwa eksiter seluruh generator menghasilkan arus eksitasi (arus medan) jauh lebih besar ketika skenario gangguan 5 diterapkan pada sistem hingga CB469 dan CB203 diputus (*trip*). Tripnya kedua CB tersebut menyebabkan arus eksitasi yang dihasilkan turun tajam. Kemudian di daerah Selatan-Tengah, arus eksitasi generator Pabelokan perlahan naik, sedangkan arus eksitasi generator Zelda menurun. Sedangkan pada

daerah Utara, arus eksitasi pada generator Seafox cenderung naik ketika arus eksitasi generator di Widuri Proses turun. Generator pada daerah yang samamenanggung beban yang sama sehingga suplai dayanya saling melengkapi. Gambar Grafik Daya Reaktif Generator pada S5 memiliki karakteristik yang sama dengan Gambar Grafik Arus Eksitasi Generator pada S5.

### c. Tegangan Bus Beban



Gambar 4.36 Grafik Tegangan CINB BUS B, T2 S, WIDD21, dan WIDG11 padaS5



Gambar 4.37 Grafik Tegangan CINB BUS B, T2 S, WIDD21, dan WIDG11 padaS5 (Sistem tanpa UVR)

Gambar 4.36 menunjukkan profil tegangan CINB BUS B, T2 S, WIDD21, dan WIDG11 pada sistem dengan UVR. Bus T2 S, WIDD21, dan WIDG11 melepas bebannya pada detik ke-30,084 (5,084 detik setelah gangguan). Beberapa saat setelah terjadi gangguan, CB203 trip untuk mengisolasi jalur yang terganggu, selain itu *reverse power relay* juga mentriapkan CB206 sehingga tidak ada suplai daya sama sekali di Platform Karmila. Hal inilah yang menyebabkan tegangan bus T2 S *collapse* dan UVR beroperasi untuk melepas beban KARA1. Sedangkan CINB BUS B melepas bebannya (CINC3) pada detik ke-54,8 karena adanya sedikit penurunan tegangan sehingga tegangan CINB BUS B mencapai nilai di bawah 80% tegangan nominal bus dalam waktu lebih dari 4,8 detik.

Gambar 4.37 menunjukkan profil tegangan bus beban pada sistem tanpa UVR. Jika dibandingkan dengan Gambar 4.36, seharusnya beban yang terhubung pada bus CINC BUS B dilepas karena dapat menyebabkan motor lepas (*stall*) jika tegangan bus kurang dari tegangan rating motor dalam waktu tertentu. Lepasnya motor dapat mengakibatkan arus yang ditarik oleh motor menjadi sangat besar (karakteristik arus saat motor akan lepas sama dengan karakteristik starting motor). Sedangkan bus WIDD21 dan WIDG11 mencapai tegangan 85% dari tegangan nominal bus pada detik ke 30,041 sehingga lebih baik jika pengaturan waktu tunda UVR untuk bus tersebut diperpanjang.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

1. Berdasarkan analisis statis pada keadaan operasi normal, dengan metode kurva Q-V didapatkan bahwa bus beban pada daerah Utara rentan mengalami ketidakstabilan tegangan jika terjadi kenaikan/penambahan beban, sedangkan tegangan bus beban di daerah Selatan dan Tengah lebih stabil.

2. Lepasnya generator PABL-G101A berkapasitas 20MW menyebabkan pelepasan beban di daerah Utara sebesar 3,195MW dan di daerah Selatan-Tengah sebesar 5,14MW untuk mencapai kembali stabilitas tegangan sistem.

3. Lepasnya generator SFX GTG1 berkapasitas 19MW menyebabkan kegagalan seluruh generator di daerah Utara sehingga terjadi pelepasan seluruh beban di daerah Utara untuk mencapai kembali stabilitas tegangan sistem.

4. Gangguan tiga fasa pada saluran transmisi Pabelokan – Zelda menyebabkan pelepasan beban di daerah Utara sebesar 3,195MW dan di daerah Selatan-Tengah sebesar 0,892MW untuk mencapai kembali stabilitas tegangan sistem.

5. Gangguan tiga fasa pada saluran transmisi Pabelokan – Krisna menyebabkan pelepasan beban di daerah Utara sebesar 3,195MW dan di daerah Selatan-Tengah sebesar 0,521MW untuk mencapai kembali stabilitas tegangan sistem.

6. Gangguan tiga fasa pada saluran transmisi Zelda – Karmila menyebabkan pelepasan beban di daerah Utara sebesar 3,195MW dan di daerah Selatan-Tengah sebesar 0,983MW untuk mencapai kembali stabilitas tegangan sistem.

7. Pelepasan beban pada tegangan kurang (*undervoltage load shedding*) yang diterapkan pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. sudah cukup efektif untuk mencegah terjadinya runtuh tegangan (*voltage collapse*) yang lebih luas, tetapi masih diperlukan pembangkit tambahan untuk menyuplai beban di daerah Utara.

8. Penggunaan kapasitor paralel dan generator dengan faktor daya tinggi lebih efektif untuk mengurangi rugi-rugi daya transmisi dan lebih fleksibel daripada penggunaan generator dengan faktor daya rendah.

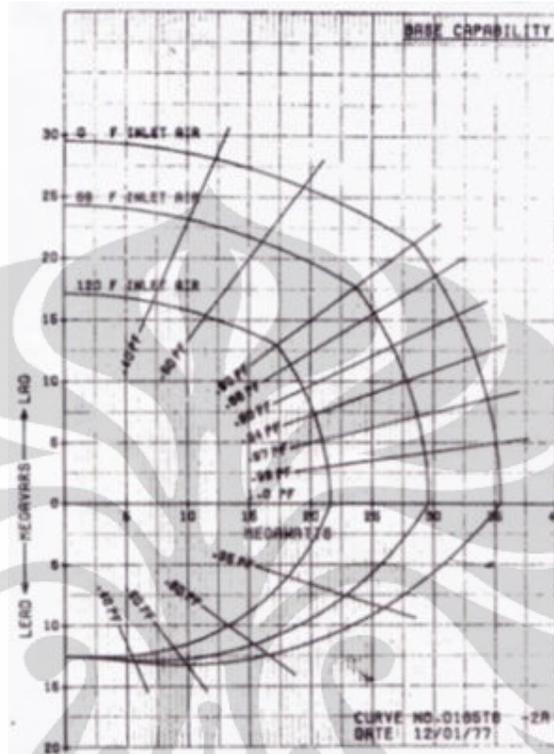
## DAFTAR ACUAN

- [1] Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. USA: McGraw-Hill.
- [2] Taylor, Carson W. 1994. *Power System Voltage Stability*. USA: McGraw-Hill.
- [3] Kundur, Prabha., Paserba, John., dkk, *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE Transactions on Power System, Vol. 19, No. 2, Mei 2004, 1387-1401.
- [4] Grigsby, Leonard L. 2007. *Power System Stability and Control, Voltage Stability*. Boca Raton: CRC Press.
- [5] GE Energy Advisory Services. 2005. *Power System Study Report to: CNOOC SES*. New York: GE Energy.

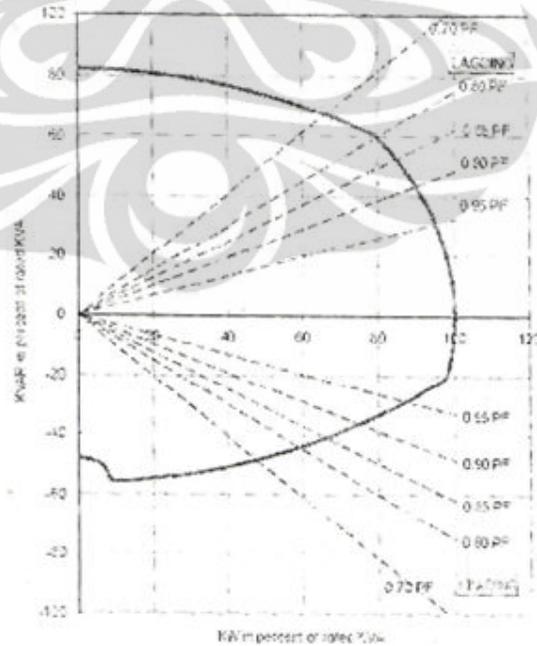
## LAMPIRAN

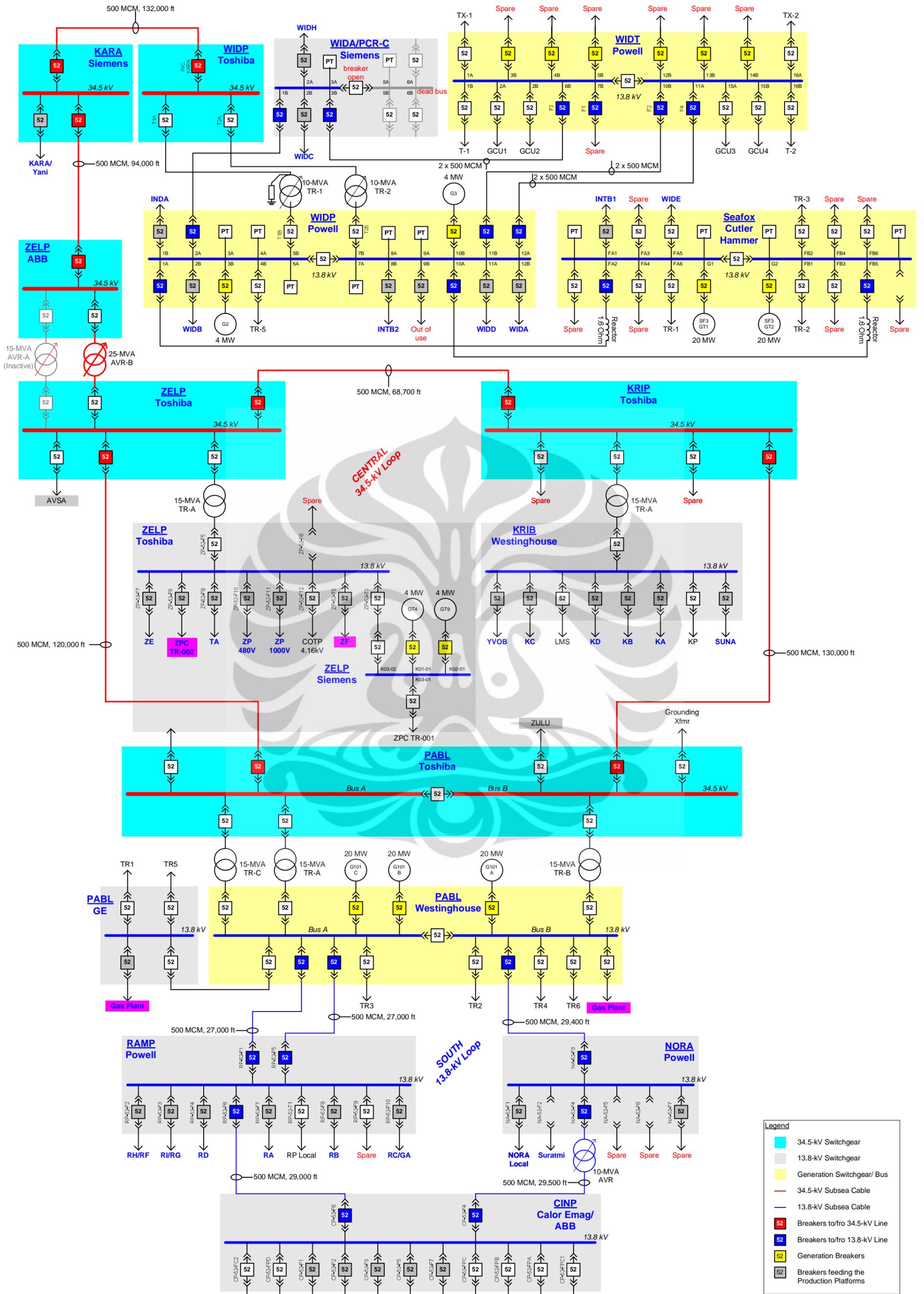


Kurva Kemampuan Generator PABL-G101A, PABL-G101B, PABL-G101C, SFX GTG1, dan SFX GTG2



Kurva Kemampuan Generator G4, G9, Gen14, dan GEN21





**Legend**

- 34.5-kV Switchgear
- 13.8-kV Switchgear
- Generation Switchgear/ Bus
- 34.5-kV Subsea Cable
- 13.8-kV Subsea Cable
- Breakers to/fro 34.5-kV Line
- Breakers to/fro 13.8-kV Line
- Generation Breakers
- Breakers feeding the Production Platforms

Condition as per May 25, '10



Drawing Title

## CNOOC SIMPLIFIED ONE LINE DIAGRAM

### Single Line Diagram

Drawing by GY/ Sep 26, 06	Update by GJA/ Mar 04, 11	Revision 5
------------------------------	------------------------------	---------------

