

SKRIPSI

**ANALISIS STABILITAS TEGANGAN DAN FREKUENSI
PADA SISTEM KELISTRIKAN KAPAL LINTAS
LEMBAR-PADANG BAI**

Disusun dan diajukan oleh:

**MASYHURI DAMIS
D091171015**



**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS STABILITAS TEGANGAN DAN FREKUENSI PADA SISTEM KELISTRIKAN KAPAL LINTAS LEMBAR-PADANG BAI

Disusun dan diajukan oleh

Masyhuri Damis
D091171015

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Haryanti Rivai, ST., MT., Ph.D
NIP 197902252002122001

Rahimuddin, ST., MT., Ph.D
NIP 197108251999031002

Ketua Program Studi,

Dr. Eng. Faisal Mahmuddin, ST., M. Inf. Tech., M.Eng
NIP 198102112005011003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Masyhuri Damis
NIM : D091171015
Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Stabilitas Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan Kapal
Lintas Lembar-Padang Bai}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Masyhuri Damis
Masyhuri Damis

ABSTRAK

MASYHURI DAMIS. Analisis Stabilitas Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan Kapal Lintas Lembar-Padang Bai (dibimbing oleh Haryanti Rivai, ST.,MT.,Ph.D dan Rahimuddin, ST.,MT.,Ph.D)

Sistem kelistrikan merupakan salah satu sistem penunjang kerja utama dikapal yang secara umum terdiri dari sumber daya, sistem distribusi dan peralatan kelistrikan. Generator dikapal keberadaannya sangat vital bagi operasional kapal karena merupakan alat bantu yang fungsinya sebagai sumber pembangkit daya listrik yang ada. Sehingga sangat penting dalam memperhatikan pemilihan kapasitas generator. Pada umumnya dalam penentuan kebutuhan kapasitas daya untuk generator pada kapal dilakukan kalkulasi beban *electric balance* sesuai kondisi operasional kapal. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus disuplai dengan besaran daya yang sesuai. Stabilitas tegangan menunjukkan kemampuan sistem dalam menjaga nilai tegangannya pada kondisi normal maupun setelah terjadi sebuah gangguan. Pemodelan rangkaian dilakukan dari pengumpulan data menggunakan *software Electrical Transient Analysis Program*. Pemodelan rangkaian ini dilakukan untuk merancang sistem agar proses dapat disimulasikan. Besarnya kebutuhan daya listrik yang dibutuhkan pada Kapal Lintas Lembar-Padang Bai yaitu untuk kondisi berlayar 411.74 kW, kondisi keluar-masuk Pelabuhan 720.67 kW, kondisi bersandar 76.82 kW, kondisi darurat 82.74 kW. Nilai kestabilan tegangan dan frekuensi pada saat komponen motor kompresor udara dengan daya 4.5 Kw dijalankan tidak mengakibatkan perubahan tegangan yang signifikan berbeda dengan pada saat motor *electric bow thruster* dengan daya 335 Kw dijalankan mengakibatkan tegangan turun menjadi 85% pada detik ke-6.5. Dalam kondisi *manuver* disarankan menghubungkan 3 generator kedalam sistem, karena apabila hanya ada 2 generator yang dihubungkan kedalam sistem maka akan menimbulkan ketidakstabilan tegangan dan frekuensi.

Kata Kunci : Kestabilan Transien, Tegangan, Frekuensi

ABSTRACT

MASYHURI DAMIS. Analysis of Voltage and Frequency Stability in the Electrical System of the Lembar-Padang Bai Cross Ship (supervised by Haryanti Rivai, ST., MT., Ph.D and Rahimuddin, ST., MT., Ph.D)

The electrical system is one of the main work support systems on ships which generally consists of power sources, distribution systems and electrical equipment. The generator on board is very vital for ship operations because it is a tool that functions as a source of existing electrical power generation. So it is very important to pay attention to the selection of generator capacity. In general, in determining the power capacity requirements for generators on ships, electric balance load calculations are carried out according to the operational conditions of the ship. Electric power systems have very dynamic load variations where every second will change, with this change the supply of electrical power is fixed and must be supplied with the appropriate amount of power. Voltage stability indicates the ability of the system to maintain its voltage value under normal conditions and after a disturbance occurs. Circuit modeling is done from data collection using Electrical Transient Analysis Program software. This circuit modeling is done to design the system so that the process can be simulated. The amount of electrical power needed on the Sheet-Padang Bai Cross Ship is for sailing conditions of 411.74 kW, conditions in and out of the Port 720.67 kW, resting conditions 76.82 kW, emergency conditions 82.74 kW. The value of voltage stability and frequency when the air compressor motor component with a power of 4.5 Kw is run does not result in significant voltage changes in contrast to when the electric bow thruster motor with a power of 335 Kw is run resulting in the voltage dropping to 85% at the 6.5th second. When maneuvering conditions it is recommended to connect 3 generators into the system, because if there are only 2 generators connected to the system it will cause voltage and frequency instability.

Keywords : Transient Stability, Voltage, Frequency

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
KATA PENGANTAR.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Generator.....	4
2.1.1 Penentuan Kapasitas Generator.....	5
2.1.2 Beban Kerja (<i>Load Factor</i>) Generator Kapal.....	6
2.1.3 Faktor Kesamarataan (<i>Diversity Factor</i>) Generator Kapal.....	6
2.2 Beban Listrik.....	6
2.2.1 Beban Resistif (R).....	7
2.2.2 Beban Induktif (L).....	8
2.2.3 Beban Kapasitif (C).....	8
2.3 Daya Listrik.....	9
2.4 Gangguan Listrik.....	10
2.4.1 Arus lebih (<i>Over Current</i>).....	10
2.4.2 Drop Tegangan atau Kelebihan Tegangan (<i>Under/ Upper Voltage</i>).....	10
2.5 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	11
2.5.1 Kestabilan <i>Steady State</i> (Keadaan tetap).....	12
2.5.2 Kestabilan Dinamis.....	12

2.5.3	Kestabilan Transient	12
2.5.4	Kestabilan Sudut Rotor (<i>Rotor Angle Stability</i>)	14
2.5.5	Kestabilan Tegangan (<i>Voltage Stability</i>).....	16
2.5.6	Kestabilan Frekuensi (<i>Frequency Stability</i>)	16
2.5.6.1	Menjaga Kestabilan Frekuensi pada Sisi Generator	19
2.6	Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan	20
2.6.1	Gangguan Akibat Hubung Singkat	20
2.6.2	Gangguan Akibat Starting Motor.....	20
2.6.3	Gangguan Akibat Penambahan Beban Secara Tiba-tiba	20
2.7	Standar batas Operasi Tegangan.....	21
2.8	Software ETAP.....	22
2.8.1	Memulai Menjalankan Etap	24
2.8.2	Rangkaian Percobaan.....	26
BAB 3 METODE PENELITIAN		27
3.1	Flow Chart.....	27
3.2	Studi Literatur.....	28
3.3	Tinjauan Lapangan	28
3.4	Pengumpulan Data.....	28
3.5	Rancangan Single Line Diagram Kapal Lintas Lembar-Padang Bai.....	33
3.6	Perhitungan Daya Listrik	33
3.7	Pemodelan Rangkaian	33
3.8	Studi Kasus Kestabilan Transient pada Sistem Kelistrikan Kapal Lintas Lembar-Padang Bai	33
3.9	Kesimpulan dan Saran	35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		36
4.1	<i>Electric Balance</i>	36
4.2	Simulasi Studi Kasus Kestabilan transien.....	45
4.2.1	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i>	45
4.2.2	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i> + 1 Gen.On (Generator Darurat)	49
4.2.3	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> pada Bus Kompartemen Lambung	53
4.2.4	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> + <i>Load Shedding</i> Bus Kompartemen Lambung	58
4.2.5	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator Off	63
4.2.6	Simulasi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator off + <i>Load Shedding</i>	68

BAB 5 PENUTUP.....	74
5.1 Kesimpulan.....	74
5.2 Saran.....	74
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Generator (Legowo, 2017)	4
Gambar 2 Gelombang Listrik Beban Resistif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya . (Fajar, G.S., 2010)	8
Gambar 3 Gelombang Listrik Beban Induktif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya (Fajar, G.S., 2010)	8
Gambar 4 Gelombang Listrik Beban Kapasitif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya (Fajar, G.S., 2010)	9
Gambar 5 Klasifikasi Stabilitas Sistem tenaga (Murthy, P.S.R., 2007).....	12
Gambar 6 (a) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem stabil,.....	13
Gambar 7 <i>Single line Diagram</i> Generator dan Motor (Kundur. P., 1994).....	15
Gambar 8 Diagram Impedansi Generator dan Motor (Kundur. P., 1994)	15
Gambar 9 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi (Arifai, 2017).....	18
Gambar 10 Elemen standar ANSI.....	23
Gambar 11 Simbol Generator di ETAP	23
Gambar 12 Simbol Transformator di ETAP	23
Gambar 13 Simbol Pemutus Rangkaian di ETAP	24
Gambar 14 Simbol Beban Statis di ETAP	24
Gambar 15 Lembar Kerja.....	25
Gambar 16 Rangkaian Percobaan One Line Diagram Sederhana.....	26
Gambar 17 <i>Flow Chart</i>	27
Gambar 18 General Arrangement Kapal Lintas Lembar-Padang Bai	28
Gambar 20 Respon Tegangan Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i>	46
Gambar 21 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i>	47
Gambar 22 Respon Tegangan Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i> + 1 Generator <i>on</i>	50
Gambar 23 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i> + 1 Generator <i>on</i>	51
Gambar 24 Respon Tegangan Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> Bus Kompartemen Lambung	54

Gambar 25 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> Bus Kopartemen Lambung.....	55
Gambar 26 Respon Tegangan Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> Bus Kopartemen Lambung + <i>Load Shedding</i>	59
Gambar 27 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> Bus Kopartemen Lambung + <i>Load Shedding</i>	60
Gambar 28 Respon Tegangan Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator Off.....	64
Gambar 29 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator Off.....	65
Gambar 30 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator Off + <i>Load Shedding</i>	69
Gambar 31 Respon Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator Off + <i>Load Shedding</i>	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Standar Variasi Tegangan dan Frekuensi Sistem Distribusi AC	21
Tabel 2 Standar Variasi Tegangan Sistem Distribusi DC	22
Tabel 3 Spesifik Generator Baudouin 6 M26.2	29
Tabel 4 Peralatan Permesinan	30
Tabel 5 Peralatan Akomodasi (Kipas Ventilasi Udara, AC, Peralatan Dapur).....	31
Tabel 6 Peralatan Kelistrikan (Lampu, Stop kontak, Navigasi, Komunikasi).....	32
Tabel 7 Perencanaan Studi Kasus	35
Tabel 8 Tabulasi <i>Electrical Balance</i> Kondisi Berlayar & Keluar Masuk Pelabuhan.....	36
Tabel 9 Tabulasi electrical balance kondisi Berlabuh & Darurat	40
Tabel 10 Tabulasi Kebutuhan Daya Listrik Kapal Lintas Lembar-Padang Bai....	44
Tabel 11 Studi Kasus Kestabilan Transien	Error! Bookmark not defined.
Tabel 12 Respon Tegangan dan Frekuensi Simulasi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i>	48
Tabel 13 Respon Tegangan dan Frekuensi Hasil Simulasi Studi Kasus Kestabilan Transien : 2 Motor <i>Starting</i> + 1 Gen.On	52
Tabel 14 Respon Tegangan dan Frekuensi Kasus Kestabilan Transien : <i>Short Circuit</i> Bus Kompartemen Lambung	56
Tabel 15 Respon Frekuensi Studi Kasus Kestabilan Transien + <i>Load Shedding</i>	61
Tabel 16 Respon Tegangan dan Frekuensi Studi Kasus Kestabilan Transien : Generator off.....	66
Tabel 17 Respon Frekuensi Studi Kasus Kestabilan Transien : 1 Generator off..	71

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
I	Arus (A)
V	Tegangan(V)
R	Hambatan (R)
P	Daya (Watt)
Cos φ	Faktor Daya
T	Waktu (s)
W	Energi Listrik (Joule)
GT	<i>Gross Tonnage (GT)</i>
LOA	<i>Length of Appendicular (m)</i>
LBP	<i>Length Between Perpendicular (m)</i>
B	Lebar (m)
H	Tinggi (m)
T	Sarat (m)
Vs	Kecepatan servis (Knot)
IL	<i>Intermitten Load</i>
CL	<i>Continous Load</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Brosur Generator Baudouin 6 M26.2	77
Lampiran 2 <i>Single Line</i> Diagram Kapal Lintas Lembar-Padang Bai	78
Lampiran 3 <i>Running</i> Kasus 2 Motor <i>Starting</i>	78
Lampiran 4 <i>Running</i> Kasus 2 Motor <i>Starting</i> + 1 Generator <i>On</i>	79
Lampiran 5 <i>Running</i> Kasus <i>Short Circuit</i> Bus Kompartemen Lambung	79
Lampiran 6 <i>Running</i> Kasus <i>Short Circuit</i> Bus Kompartemen Lambung + <i>LS</i>	80
Lampiran 7 <i>Running</i> Kasus 1 Generator Off	80
Lampiran 8 <i>Running</i> Kasus 1 Generator Off + <i>Load Shedding</i>	81
Lampiran 9 Rancangan <i>Single Line Diagram</i> Kapal Lintas Lembar-Padang Bai	82

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamiin segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dan shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia menuju peradaban yang lebih baik.

Penelitian ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi yang berjudul “Analisis Stabilitas Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan Kapal Lintas Lembar-Padang Bai” ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan di dalamnya. Namun, terlepas dari segala kekurangan tersebut penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda Damis Darise dan Ibunda Nurmin selaku orang tua penulis yang telah memberikan motivasi, dukungan materi serta doa yang senantiasa dipanjatkan sehingga penulis dapat menjalankan perkuliahan dengan baik.
2. Ibu Haryanti Rivai, ST.,MT.,Ph.D dan Bapak Rahimuddin, ST.,MT.,Ph.D selaku pembimbing yang telah meluangkan banyak waktu serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
3. Bapak Dr.Eng.Faisal Mahmuddin, ST.,M.Inf.Tech.,M.Eng dan Bapak Surya Hariyanto ST.,MT selaku penguji yang telah memberikan segala masukan dalam penelitian ini.
4. Seluruh Dosen dan Staff Departemen Teknik Sistem Perkapalan Universitas Hasanuddin yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan maupun dalam penyelesaian penelitian ini.
5. Seluruh teman-teman seperjuangan Teknik Sistem Perkapalan angkatan 2017 yang senantiasa memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Dalam Penelitian ini penulis sadar masih banyak terdapat kekurangan dan masih jauh dalam kata sempurna. Oleh karena itu penulis memohon maaf dan senantiasa menerima kritikan dan masukan yang membangun untuk perbaikan-

perbaikan kedepannya. Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang berkenan untuk membaca dan mempelajarinya.

Gowa, Mei 2023

Penulis

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan merupakan salah satu sistem penunjang kerja utama dikapal yang secara umum terdiri dari sumber daya, sistem distribusi dan peralatan kelistrikan. Daya listrik yang tersedia digunakan untuk memenuhi kebutuhan penerangan, peralatan navigasi dan komunikasi, sistem alarm dan monitoring, pengaturan udara dan sistem refrigrasi, motor pompa dan permesinan dek, serta propulsi. Pada umumnya digunakan generator untuk memenuhi kebutuhan beban listrik dikapal namun pada kondisi tertentu seperti *blackout*, beban akan disupply dari *emergency* generator atau baterai yang disimpan di ruangan *Emergency Source of Electrical Power (ESEP)*.

Generator dikapal keberadaannya sangat vital bagi operasional kapal karena merupakan alat bantu yang fungsinya sebagai sumber pembangkit daya listrik yang ada. Sehingga sangat penting dalam memperhatikan pemilihan generator. Pemilihan kapasitas generator yang sesuai menjadi faktor terpenting dalam pemilihan sistem pembangkit listrik dikapal. Pada umumnya dalam penentuan kebutuhan kapasitas daya untuk generator pada kapal menggunakan perhitungan analisa beban listrik, selanjutnya dilakukan kalkulasi beban *electric balance* sesuai kondisi operasional kapal. Penentuan kapasitas dan dimensi generator harus sesuai dengan kebutuhan, tidak boleh terlalu kecil kapasitasnya dan tidak boleh terlalu besar untuk dimensinya.

Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus disupply dengan besaran daya yang sesuai. Penambahan beban secara mendadak akan berdampak pada penurunan frekuensi sistem, begitu pula apabila ada unit pembangkit yang mengalami gangguan dan keluar (*trip*) dari sistem juga akan berdampak pada penurunan frekuensi (Liliana, 2010)

Stabilitas tegangan menunjukkan kemampuan sistem dalam menjaga nilai tegangannya pada kondisi normal maupun setelah terjadi sebuah gangguan. Selain disebabkan oleh gangguan, penambahan beban dan perubahan konfigurasi sistem juga bisa mempengaruhi nilai stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik.

Terjadinya ketidakstabilan tegangan menyebabkan nilai tegangan pada sisi penerima turun dari batas normalnya. Hal tersebut dapat mengakibatkan pada kondisi yang disebut *voltage collapse* dan tegangan akan turun pada nilai terendah sehingga bisa menimbulkan kejadian *blackout* sistem secara keseluruhan maupun parsial.

Berdasarkan dari uraian diatas maka penulis bertujuan untuk melakukan penelitian dengan judul “Analisis Stabilitas Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan Kapal Lintas Lembar-Padang Bai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa besar kebutuhan daya listrik pada Kapal Lintas Lembar-Padang Bai?
2. Bagaimana nilai kestabilan tegangan generator pada saat terjadi gangguan?
3. Bagaimana nilai kestabilan frekuensi generator pada saat terjadi gangguan?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan masalah dalam penelitian ini lebih terarah pada tercapainya tujuan penelitian maka peneliti memberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Data peralatan dan komponen kapal yang digunakan adalah kapal Lintas Lembar-Padang Bai
2. Hanya menganalisis nilai kestabilan tegangan dan frekuensi generator pada saat kondisi manuver
3. Simulasi menggunakan Electrical Transient Analysis Program.

1.4 Tujuan Penelitian

Dalam penelitian yang diusulkan memiliki tujuan utama sebagai berikut:

1. Mengetahui besar kebutuhan daya listrik pada kapal Lintas Lembar-Padang Bai

2. Mengidentifikasi nilai kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan kapal
3. Mengidentifikasi nilai kestabilan frekuensi pada sistem kelistrikan kapal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengamati nilai tegangan dan frekuensi pada sistem kelistrikan *single line* diagram dikapal agar memiliki nilai yang lebih stabil.
2. Sebagai penunjang untuk penelitian – penelitian selanjutnya mengenai analisis stabilitas tegangan dan frekuensi pada sistem kelistrikan kapal

1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penyusunan skripsi dan pembaca memahami uraian dan makna secara sistematis maka skripsi ini disusun dengan pola sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penguraian secara singkat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang dasar teori dari generator set, prinsip kerja, aturan BKI, perhitungan elektrik balance, serta program komputer berbasis etap.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang waktu dan lokasi penelitian, metode yang digunakan pada penelitian yaitu metode studi literatur, alur penelitian yang berupa pengumpulan data generator diperoleh ketika penelitian telah dilakukan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil perhitungan data untuk simulasi pembebanan generator

BAB V. PENUTUP

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil percobaan dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada percobaan yang akan datang.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator adalah alat bantu kapal yang berguna untuk memenuhi kebutuhan listrik di atas kapal. Dalam penentuan kapasitas generator kapal yang akan digunakan untuk melayani kebutuhan listrik di atas kapal maka analisa beban dibuat untuk menentukan jumlah daya yang dibutuhkan dan variasi pemakaian untuk kondisi operasional seperti manuver, berlayar, berlabuh atau bersandar serta beberapa kondisi lainnya. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui daya minimum dan maksimum yang dibutuhkan (Purba dkk, 2015).

Fungsi utama generator di atas kapal adalah untuk menyuplai kebutuhan daya listrik di kapal. Daya listrik digunakan untuk menggerakkan motor-motor dari peralatan bantu pada kamar mesin dan mesin-mesin geladak, lampu penerangan, sistem komunikasi dan navigasi, pengkondisian udara (AC) dan ventilasi, perlengkapan dapur (*galley*), sistem sanitari, *cold storage*, alarm dan sistem kebakaran, dan peralatan lainnya.

Prinsip kerja dari generator yaitu rotor diputar maka belitan kawatnya akan memotong gaya-gaya magnet pada kutub-kutub magnetnya sehingga menimbulkan perbedaan tegangan dan menghasilkan arus listrik. Generator adalah alat bantu di kapal yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan listrik di kapal, dalam merencanakan sistem kelistrikannya perlu diperhatikan kebutuhan maksimum dan minimum daya rata-rata pada interval waktu tertentu selama periode kerja dari peralatan yang ada (Legowo, 2017).



Gambar 1 Generator (Legowo, 2017)

2.1.1 Penentuan Kapasitas Generator

Generator kapal merupakan alat bantu kapal yang berguna untuk memenuhi kebutuhan listrik diatas kapal. Dalam penentuan kapasitas generator kapal yang akan digunakan untuk melayani kebutuhan listrik diatas kapal maka analisa beban dibuat untuk menentukan jumlah daya yang dibutuhkan dan variasi pemakaian untuk kondisi operasional seperti manuver, berlayar, berlabuh atau bersandar serta beberapa kondisi lainnya. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui daya minimum dan maksimum yang dibutuhkan.

Daya cadangan harus dimasukkan perhitungan untuk menutup kebutuhan daya listrik kapal pada puncak beban yang terjadi pada periode yang singkat, misalnya bila digunakan untuk mengasut motor – motor besar. Jika dilihat secara regulasi BKI mensyaratkan untuk daya keluar dari generator kapal sekurang-kurangnya diperlukan untuk pelayanan dilaut harus 15% lebih tinggi daripada kebutuhan daya listrik kapal yang ditetapkan dalam balans daya. Selain itu juga harus diperhatikan faktor pertumbuhan beban untuk masa akan datang. Untuk menentukan kapasitas generator di kapal dipergunakan suatu tabel balans daya yang mana seluruh peralatan listrik yang ada kapasitasnya atau dayanya tertera dalam tabel tersebut (Legowo, 2017).

Sehingga dengan balans daya dapat diketahui daya listrik yang diperlukan untuk masing – masing kondisi operasional kapal. Dalam penentuan electric balans BKI Vol. IV (Bab I, D.I) mengisyaratkan bahwa :

1. Seluruh perlengkapan pemakaian daya yang secara tetap diperlukan untuk memelihara pelayanan normal harus diperhitungkan dengan daya kerja penuh.
2. Beban terhubung dari seluruh perlengkapan cadangan harus dinyatakan. Dalam hal perlengkapan pemakaian daya nyata yang hanya bekerja bila suatu perlengkapan serupa rusak, kebutuhan dayanya tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan.
3. Daya masuk total harus ditentukan, dari seluruh pemakaian daya yang hanya untuk sementara dimasukkan, dikalikan dengan suatu faktor kesamaan waktu bersama (*common simultancity factor*) dan ditambahkan

kepada daya masuk total dari seluruh perlengkapan pemakaian daya yang terhubung tetap.

4. Daya masuk total sebagaimana telah ditentukan sesuai 1 dan 3 maupun daya yang diperlukan untuk instalasi pendingin yang mungkin ada, harus dipakai sebagai dasar dalam pemberian ukuran instalasi generator.

2.1.2 Beban Kerja (*Load Factor*) Generator Kapal

Load factor peralatan kapal adalah perbandingan waktu dan pemakaian peralatan yang dinyatakan dalam presentase. Untuk peralatan yang jarang digunakan dianggap mempunyai beban nol seperti *fire pump*, *anchor windlass*, *capstan* dan *boat winches* (Hadi, E.S., 2009).

2.1.3 Faktor Kesamarataan (*Diversity Factor*) Generator Kapal

Peralatan listrik di kapal memiliki pembebanan spesifik dikarenakan peralatan bekerja pada pemakaian yang tidak teratur secara bersamaan. *Diversity Factor* Sebagai perbandingan antara jumlah kebutuhan *Intermittent Load* dengan jumlah total kebutuhan daya listrik. Pembebanan pada kapal dibagi menjadi dua yaitu :

1. Beban kontinyu (*continuous Load*) generator kapal

Beban ini terdapat pada peralatan yang digunakan secara terus-menerus selama pelayaran. Contohnya lampu navigasi, pompa untuk CPP, dll.

$$CL = \text{Input} \times \text{Jumlah Kerja} \times LF$$

2. Beban generator kapal Terputus – putus (*Intermittent Load*)

Beban ini terdapat pada peralatan yang digunakan secara periodik selama pelayaran. Contohnya pompa transfer bahan bakar, pompa air tawar, dll (Hadi, E.S., 2009).

$$IL = \text{Input} \times \text{Jumlah Kerja} \times LF$$

2.2 Beban Listrik

Beban listrik adalah segala sesuatu yang ditanggung oleh pembangkit listrik atau segala yang membutuhkan tenaga listrik. Pemilihan beban listrik akan mempengaruhi pemakaian listrik. Pada kehidupan sehari-hari beban listrik mencakup peralatan listrik seperti lampu, televisi, kulkas, setrika, AC, kipas angin,

dll. Beban listrik dikenal sebagai hambatan atau resistan pada suatu rangkaian listrik, yang mempunyai hubungan dengan tegangan dan arus listrik seperti yang disebutkan pada hukum ohm. Dimana arus berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan hambatan, karena dapat menghalangi aliran arus (Fajar, G.S., 2010).

Hukum Ohm pada mulanya terdiri dari dua bagian. Bagian pertamanya hanya merumuskan persamaan hambatan, namun Hukum Ohm juga menyatakan bahwa R adalah sebuah konstanta yang independen terhadap V dan I dimana hubungan tegangan sama dengan arus di kali hambatan. Hubungan ini dapat diterapkan pada resistor apapun, dimana V adalah beda potensial antara kedua ujung resistor tersebut, I adalah arus yang melewati resistor tersebut, dan R adalah hambatan resistor pada kondisi-kondisi tersebut . Hambatan dinotasikan dengan R dan satuan Ohm (Ω). Secara matematis, hukum ohm dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots 1$$

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots 2$$

$$V = I \times R \dots\dots\dots 3$$

Ket : I = Arus dalam satuan Ampere (A)

V = Tegangan dalam satuan Volt (V)

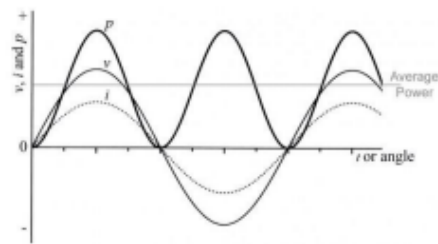
R = Hambatan dalam satuan Ohm (Ω)

Karakteristik beban listrik dalam listrik arus AC terbagi menjadi tiga macam, antara lain sebagai berikut:

2.2.1 Beban Resistif (R)

Merupakan beban yang hanya terdiri dari komponen ohm (*resistance*). Alat listrik yang termasuk beban resistif bekerja berdasarkan prinsip resistor, sehingga arus listrik yang melewatinya akan terhambat dan akibatnya alat listrik tersebut akan menghasilkan panas. Beban resistif mencakup elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar. Beban jenis resistif hanya mengonsumsi beban aktif dan mempunyai faktor daya bernilai satu. Secara matematis, beban resistif dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = V \times I \dots\dots\dots 4$$

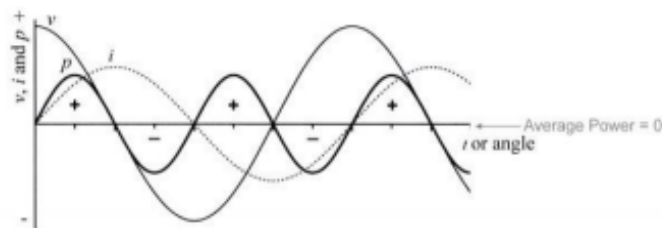


Gambar 2 Gelombang Listrik Beban Resistif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya
(Fajar, G.S., 2010)

2.2.2 Beban Induktif (L)

Merupakan beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti coil, transformator dan solenoid. Beban induktif dapat mengakibatkan pergeseran fasa (phase shift) pada arus sehingga bersifat tertinggal (lagging) sebesar 90° terhadap tegangan. Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis induktif menyerap daya aktif dan daya reaktif. Contoh beban induktif dikehidupan sehari-hari yaitu motor listrik, mesin las listrik, lampu hemat energi, dll. Secara matematis, beban induktif dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos\mu \dots \dots \dots 5$$



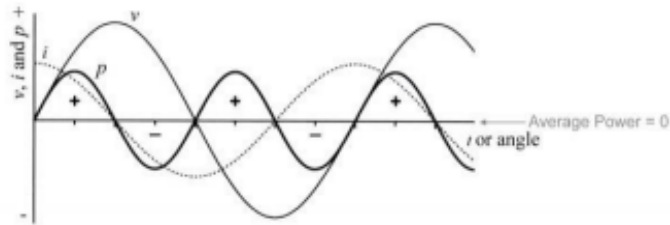
Gambar 3 Gelombang Listrik Beban Induktif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya
(Fajar, G.S., 2010)

2.2.3 Beban Kapasitif (C)

Merupakan beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (electrical discharge) pada suatu rangkaian listrik. Hal ini dapat mengakibatkan arus mendahului tegangan (leading). Beban kapasitif menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Alat listrik

yang termasuk jenis beban kapasitif adalah kapasitor atau kondensator. Secara matematis, beban kapasitif dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos\mu \dots\dots\dots 6$$



Gambar 4 Gelombang Listrik Beban Kapasitif Terhadap Tegangan, Arus dan Daya (Fajar, G.S., 2010)

2.3 Daya Listrik

Daya listrik adalah besar energi listrik yang ditransfer oleh suatu rangkaian listrik tertutup. Daya listrik sebagai bentuk energi listrik yang mampu diubah oleh alat-alat pengubah energi menjadi berbagai bentuk energi lain, misalnya energi gerak, energi panas, energi suara, dan energi cahaya. Selain itu, daya listrik ini juga mampu disimpan dalam bentuk energi kimia. Baik itu dalam bentuk kering (baterai) maupun dalam bentuk basah (aki). Daya merupakan jumlah energi listrik yang mengalir dalam setiap satuan waktu (detik). Sehingga formula daya listrik bisa dituliskan sebagai berikut:

$$P = W/t \dots\dots\dots 7$$

Dimana:

P = daya (Watt atau Joule/sekon);

W = energi listrik (Joule);

t = waktu (sekon).

$$P = V \times I \dots\dots\dots 8$$

$$P = I^2 \times R \dots\dots\dots 9$$

$$P = V^2/R \dots\dots\dots 10$$

Dimana:

R = hambatan (Ohm)

V = tegangan (Volt)

I = kuat arus (Ampere)

2.4 Gangguan Listrik

Penggunaan listrik di kehidupan sehari-hari tidak selalu berjalan dengan baik. Akan ada situasi listrik mengalami beberapa gangguan yang mengakibatkan beberapa kerugian seperti rusaknya peralatan listrik, hingga mengakibatkan korban jiwa. Begitu juga pada penggunaan listrik di rumah tinggal, terdapat beberapa potensi gangguan listrik yang mengancam keselamatan pengguna jika tidak memahami gangguan kelistrikan dan cara mengantisipasi yang baik dan benar. Adapun beberapa gangguan listrik yang sering terjadi di rumah tinggal antara lain sebagai berikut:

2.4.1 Arus lebih (Over Current)

Arus lebih yaitu gangguan yang diakibatkan karena arus yang mengalir memiliki nilai lebih besar daripada rating arus kerja yang ditetapkan untuk suatu rangkaian. Arus lebih ini dapat muncul dalam dua cara yaitu sebagai arus beban lebih dan sebagai arus hubung singkat atau arus gangguan. Astuti (2011) menyatakan arus listrik merupakan laju perpindahan muatan pada suatu luasan. Dengan demikian, arus adalah banyaknya muatan yang mengalir pada suatu luasan penampang penghantar per satuan waktu. Besarnya arus yang mengalir pada suatu rangkaian listrik dipengaruhi oleh besarnya beda potensial yang diterapkan kepadanya.

2.4.2 Drop Tegangan atau Kelebihan Tegangan (*Under/ Upper Voltage*)

Drop Tegangan atau Kelebihan Tegangan merupakan suatu gangguan yang dapat merusak berbagai peralatan elektronik di rumah. Gangguan ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya karena adanya gangguan hubung singkat di sistem tenaga listrik, trafo distribusi yang sudah kelebihan beban, sambungan listrik yang kendur dan adanya arus listrik yang terlalu besar sehingga tegangan menurun. Menurut Peraturan Umum Instalasi Listrik drop voltase antara terminal pelanggan dan sembarang titik dari instalasi tidak boleh melebihi 5% dari voltasi pengenal pada terminal pelanggan. Dengan begitu jika tegangan dirumah tinggal sebesar 220V, penurunan tegangan yang diperbolehkan hanya sampai 210V.

2.5 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga keadaan sistem tetap sinkron dan seimbang ketika terjadi gangguan pada sistem. Kategori gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik dapat digolongkan menjadi 2 jenis yaitu:

1. Gangguan Kecil

Gangguan kecil merupakan gangguan berupa perubahan pembebanan pada pembangkit akibat permintaan beban yang berubah-ubah secara signifikan. Hal ini dapat mengganggu kinerja dari generator karena harus mengikuti perubahan tersebut.

2. Gangguan Besar

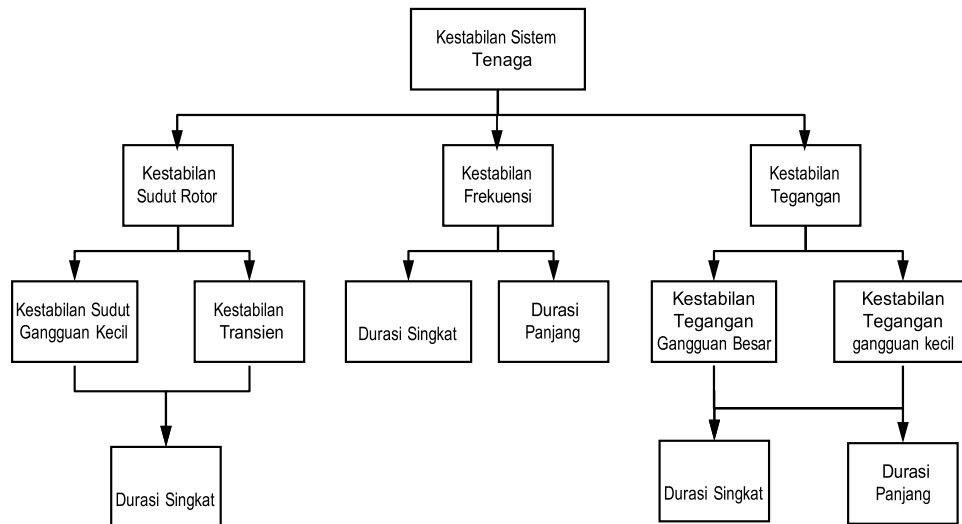
Gangguan besar merupakan gangguan berupa perubahan besar suatu nilai yang terjadi secara mendadak pada sistem tenaga listrik dan dapat seketika itu juga mengganggu kestabilan dari sistem. Gangguan ini tidak boleh dibiarkan terlalu lama agar tidak mengganggu sistem. Gangguan yang terjadi pada sistem dapat menyebabkan masalah kestabilan dari sistem tenaga listrik. Analisis kestabilan pada umumnya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu :

1. Kestabilan Keadaan Tetap (Steady State Stability)
2. Kestabilan Dinamis (Dynamic Stability)
3. Kestabilan Transien (Transient Stability)

Kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori (Murthy, P.S.R, 2007):

1. Kestabilan Sudut Rotor
2. Kestabilan Frekuensi
3. Kestabilan Tegangan

Pada kestabilan sudut rotor dapat dibagi menjadi menjadi 2 jenis kestabilan yaitu kestabilan gangguan kecil (steady state) dan kestabilan transien. Pada kestabilan tegangan juga dapat dibagi menjadi 2 jenis kestabilan tegangan yaitu kestabilan tegangan gangguan kecil dan kestabilan tegangan gangguan besar. Untuk lebih jelas mengenai pengelompokan kestabilan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Klasifikasi Stabilitas Sistem tenaga (Murthy, P.S.R., 2007)

2.5.1 Kestabilan *Steady State* (Keadaan tetap)

Kestabilan steady state merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga sistem agar tetap stabil pada saat terjadi gangguan kecil yang terjadi secara berulang. Kemampuan suatu generator untuk menjaga kestabilan sangat bergantung pada torsi elektromagnetik dan torsi mekanik. Torsi elektromagnetik bergantung dari pengaturan tegangan pada AVR generator, sedangkan torsi mekanik bergantung dari pengaturan putaran turbin yang diatur oleh governor. Salah satu ciri masalah kestabilan steady state generator adalah bergesernya titik operasi suatu pembangkit dari daerah aman menuju daerah kritis akibat dari perubahan sistem secara perlahan namun terus menerus (Rusilawati, 2015).

2.5.2 Kestabilan Dinamis

Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) hingga sistem mencapai kondisi equilibrium steady-state yang baru (Priawan, A.R., 2015).

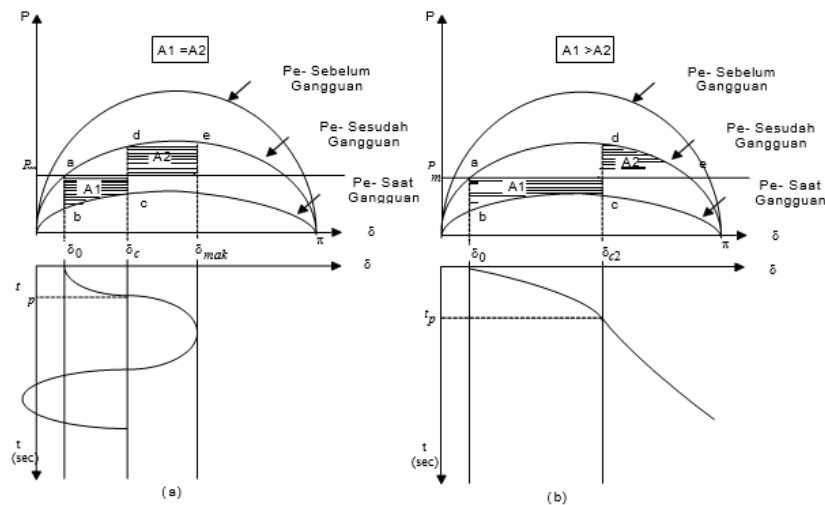
Analisa kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.

2.5.3 Kestabilan Transient

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem daya untuk kembali dalam kondisi sinkron setelah terjadi gangguan yang besar (Saadat, H., 2002). Jadi, studi

stabilitas transien dihubungkan dengan efek distorbansi-distorbansi yang besar. Selain itu melihat kondisi kestabilan sistem, studi kestabilan transien juga bertujuan untuk menentukan berapa besar waktu pemutusan kritis atau batas maksimum gangguan dihilangkan.

Studi kestabilan transien dapat lebih lanjut dibagi ke kedalam dua bagian yang meliputi kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*) (Aprilia dkk, 2015). Kestabilan ayunan pertama generator dimodelkan dengan sederhana yaitu tanpa memasukkan sistem-sistem pengaturannya. Periode waktu yang diselidiki yaitu pada detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem seperti yang terlihat pada Gambar 6. Yang Jika generator-generator pada sistem tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama maka sistem dikatakan dalam keadaan stabil. Namun umumnya lama studi kestabilan digunakan 2 sampai dengan 3 detik agar bentuk kurva ayunan sudut rotor jelas terlihat (Kundur, P., 1994). Untuk kestabilan ayunan majemuk meliputi periode yang lebih lama karena itu, pengaruh dari sistem-sistem pengaturan generator sudah dipertimbangkan, seperti pada gambar 6.



Gambar 6 (a) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem stabil,

(b) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem tidak stabil.

(Kundur, P., 1994 : 834)

Kestabilan transien merupakan kestabilan sistem dalam menahan gangguan besar, seperti gangguan hubung singkat di saluran transmisi maupun di unit

pembangkit, terlepasnya suatu unit pembangkit atau beban, dan lain-lain. Kestabilan transien terkait dengan pengoperasian generator di dalam sistem.

gangguan, terjadi ketidak-seimbangan antara torka mekanik turbin dan torka elektrik, akibatnya rotor mengalami percepatan atau perlambatan sehingga posisi rotor berubah. Generator akan terlepas dari sistem ketika kopel antara torka mekanik dan torka elektrik mengalami kegagalan, sehingga rotor tidak berputar secara sinkron terhadap sistem (*loss of synchronism*). Batas kestabilan bisa berdasarkan dua hal, yaitu:

1. Batas daya maksimum yang masih bisa disalurkan tanpa kehilangan kesinkronan sistem setelah terjadi gangguan. Batas ini berkaitan dengan batas maksimum tenaga yang bisa dialirkan dengan jaminan kestabilan akan tetap terjaga ketika suatu gangguan terjadi.
2. Waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*), yaitu batas waktu yang masih diijinkan agar sistem masih tetap sinkron setelah gangguan terjadi. Waktu pemutusan kritis ini menjadi topik bahasan dalam Tugas Akhir ini.

Kestabilan sistem tenaga menurut IEEE/CIGRE *Joint Task Force* dapat diklasifikasikan seperti pada gambar 5.

2.5.4 Kestabilan Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*)

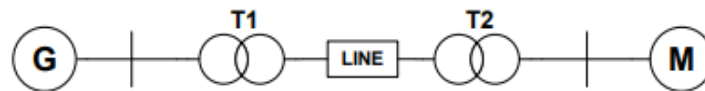
Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terhubung pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi agar tetap sinkron pada saat setelah terjadi gangguan pada sistem. Kemampuan mesin sinkron untuk menjaga kestabilan dipengaruhi oleh kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada tiap mesin sinkron yang terhubung pada sistem. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan perubahan kecepatan sudut rotor yang ekstrim sehingga dapat membuat generator kehilangan sinkronisasi (Kundur. P., 1994).

Pada saat sistem bekerja dalam kondisi steady state terdapat kesetimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing-masing generator yang terhubung dengan sistem. Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan ini akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor suatu generator. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, terjadi perbedaan posisi sudut rotor dengan generator yang berputar lebih pelan.

Perbedaan sudut ini dapat terjadi karena adanya gangguan yang terjadi pada sistem. Berdasarkan gangguan yang terjadi pada sistem, kestabilan sudut rotor dapat dibagi menjadi 2 kategori yaitu (Kundur. P., 1994) :

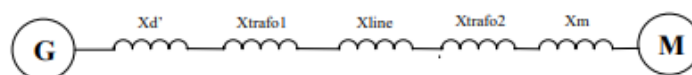
1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil atau dapat disebut dengan kestabilan steady state. Gangguan kecil yang sering terjadi dikarenakan perubahan beban secara bertahap dan terus menerus.
2. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau dapat disebut kestabilan transient. Gangguan besar yang terjadi biasanya disebabkan karena adanya hubung singkat pada sistem.

Salah satu karakteristik terpenting dalam kestabilan sistem tenaga listrik adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron.



Gambar 7 *Single line Diagram* Generator dan Motor (Kundur. P., 1994)

Gambar 7 merupakan single line diagram generator dan motor yang terhubung oleh line transmisi pada suatu jarak tertentu. Line transmisi memiliki nilai resistansi dan reaktansi yang bergantung dari panjang line transmisi yang digunakan. Semakin panjang line transmisi maka akan menghasilkan line charging yang semakin besar sehingga nilai reaktansinya semakin dominan. Dalam proses penggambaran diagram impedansi dari saluran transmisi hanya nilai reaktansi yang digambarkan karena nilai resistansinya yang kecil. X_L adalah reaktansi induktif yang diperhitungkan pada reaktansi *line* transmisi dari kasus ini. Simbol G mewakili generator, sedangkan simbol M mewakili motor sinkron. Baik generator dan motor memiliki nilai impedansi yang berbeda-beda (X_G dan X_M). Trafo juga memiliki nilai impedansi yang berbeda-beda bergantung pada nilai kapasitas trafo itu sendiri. Sehingga berdasarkan diagram impedansi dari Gambar 7 dapat digambarkan pada Gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8 Diagram Impedansi Generator dan Motor (Kundur. P., 1994)

Untuk membedakan sudut δ diantara rotor generator dan rotor motor, dengan menggunakan daya generator sebagai penyuplai motor 8 sebagai fungsi pembeda. Terdapat tiga komponen yang membedakan sudut δ yaitu:

1. Sudut generator internal
2. Sudut motor internal
3. Pada generator dan motor terdapat perbedaan sudut tegangan

2.5.5 Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*)

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk tetap menjaga tegangan agar tetap stabil pada setiap bus saat terjadi gangguan pada sistem. Sistem tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya turun atau naiknya tegangan pada beberapa bus bahkan dapat menyebabkan terjadinya voltage collapse. Kemungkinan yang terjadi apabila tegangan tidak stabil mengakibatkan pelepasan beban atau lepasnya transmisi dikarenakan sistem proteksi terlalu cepat bekerja. Tidak sinkronnya antar generator dapat terjadi akibat pelepasan tersebut atau kondisi arus melewati batas yang ditentukan. Klasifikasi kestabilan tegangan dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu (Kundur. P., 1994):

1. Kestabilan Tegangan Akibat Gangguan Kecil Kemampuan sistem tenaga untuk menjaga kondisi tegangan tetap stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan pada permintaan beban pada sistem secara mendadak dan berulang-ulang.
2. Kestabilan Tegangan Akibat Gangguan Besar Kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan agar tetap stabil setelah mengalami gangguan besar seperti gangguan generator yang lepas dari jaringan dan terjadinya gangguan short circuit.

2.5.6 Kestabilan Frekuensi (*Frequency Stability*)

Kestabilan frekuensi adalah kestabilan untuk menjaga frekuensi operasi sistem untuk tetap berada pada harga nominalnya setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan ini ditandai dengan ayunan frekuensi yang jika terjadi terus-menerus akan berujung pada lepasnya generator atau beban (Kundur. P., 2004).

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang besar dapat mengakibatkan kegagalan-kegagalan unit-unit pembangkitan secara beruntun yang menyebabkan kegagalan sistem secara total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dengan menggunakan rele frekuensi (*under frequency relay*) dapat mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikannya ke kondisi frekuensi yang normal. Dengan semakin berkembangnya sistem tenaga listrik dan dengan adanya pembangkit-pembangkit baru yang masuk dalam sistem interkoneksi, maka penyetelan rele frekuensi sudah perlu ditinjau kembali. Salah satu karakteristik pada sistem tenaga listrik yang sangat penting untuk dijaga kestabilannya adalah frekuensi. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energi yang berkualitas bagi konsumen. Pasokan energi dengan frekuensi yang berkualitas baik akan menghindarkan peralatan konsumen dari kerusakan (umumnya alat hanya dirancang untuk dapat bekerja secara optimal pada batasan frekuensi tertentu saja 50 s.d 60 Hz) (Arifai, 2017).

Pengendalian frekuensi tidak semata untuk memuaskan pelanggan semata, tindakan ini juga bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem. Pertama kita lihat hubungan antara torsi mekanik (T_m), torsi elektrik (T_e), jumlah total moment inersia dari rotor (J), dan percepatan angular dari rotor

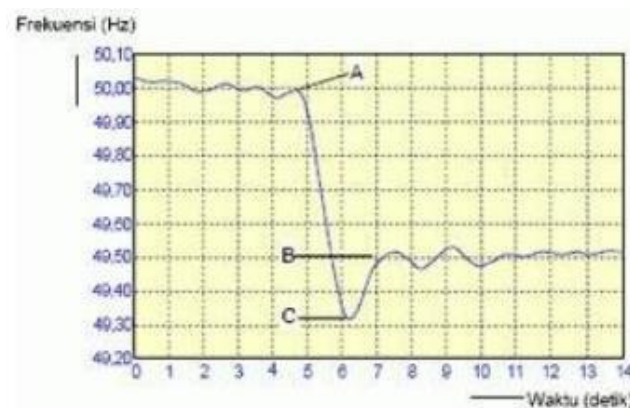
$$(d^2 \theta_m) / (dt^2)$$

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$$

Dari rumus diatas terlihat bahwa Ketika

1. Torsi mekanik = torsi elektrik maka $T_a = 0$ yang berarti pula tidak ada percepatan yang dialami oleh rotor. Karena tidak ada percepatan, maka rotor berputar pada kecepatan yang tetap sehingga menghasilkan tegangan dengan frekuensi yang konstan. Keadaan ini terjadi ketika tercapai keseimbangan antara jumlah energi yang dibangkitkan dengan energi yang diserap beban.

2. $T_m > T_e$ maka tercipta kelebihan torsi sebesar T_a yang menyebabkan timbulnya percepatan $\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$ rotor sebesar sehingga frekuensi tegangan yang dibangkitkan naik sampai tercapai nilai tertentu dan tercipta keseimbangan baru antara T_m dan T_e .
3. $T_m < T_e$ maka tercipta kekurangan torsi sebesar T_a yang menyebabkan timbulnya perlambatan $\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$ rotor sebesar sehingga frekuensi tegangan yang dibangkitkan turun sampai tercapai nilai tertentu dan tercipta keseimbangan baru antara T_m dan T_e (Arifai, 2017).



Gambar 9 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi (Arifai, 2017)

Ilustrasi gambar diatas menunjukkan bahwa ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban akan menyebabkan frekuensi bergeser dari nilai normalnya.

Dalam hal ini ketika pembangkitan $>$ beban maka frekuensi sistem akan $>$ 50 Hz, begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu perlu selalu dijaga keadaan yang seimbang antara pembangkitan dan beban agar tercipta frekuensi sitem yang normal 50 Hz.

Penanganan ketika terjadi keadaan dimana frekuensi $<$ 50 Hz dapat dilakukan dengan cara :

1. Menambahkan jumlah total energi yang di suplai ke sistem melalui cara menambah unit pembangkit yang bekerja.
2. Memanfaatkan fasilitas LFC (*Load Frequency Control*)/AGC yang mengendalikan putaran generator sesuai dengan fluktuasi beban. Ketika beban besar makan AGC akan memberikan bahan bakar lebih banyak agar

unit pembangkit dapat membangkitkan energi sesuai yang dibutuhkan oleh beban.

3. Apabila unit pembangkit sudah beroperasi maksimal, maka dengan terpaksa harus dilakukan pengurangan beban melalui *manual load shedding* (pembuangan beban) ataupun melalui relai UFR yang bekerja ketika frekuensi sistem berada dibawah nilai settingnya (Arifai, 2017).

2.5.6.1 Menjaga Kestabilan Frekuensi pada Sisi Generator

Pasokan listrik ke beban dimulai dengan menhidupkan satu generator, kemudian secara sedikit demi sedikit beban dimasukkan sampai dengan kemampuan generator tersebut, selanjutnya menhidupkan lagi generator berikutnya dan memparalelkan dengan generator pertama untuk memikul beban yang lebih besar lagi. Saat generator kedua diparalelkan dengan generator pertama yang sudah memikul beban diharapkan terjadinya pembagian beban yang semula ditanggung generator pertama, sehingga terjadi kerjasama yang meringankan sebelum beban-beban selanjutnya dimasukkan.

Seberapa besar pembagian beban yang ditanggung oleh masing-masing generator yang bekerja paralel akan tergantung jumlah masukan bahan bakar dan udara untuk pembakaran mesin diesel, bila mesin penggerak utamanya diesel atau bila mesin-mesin penggerak lainnya maka tergantung dari jumlah (debit) air ke turbin air, jumlah (entalpi) uap/gas ke turbin uap/gas atau debit aliran udara ke mesin baling-baling (Arifai, 2017).

Pada sistem kontrol otomatis pamaralelan generator dapat dilakukan oleh SPM (modul pamaralel generator) dengan mengatur tegangan dan frekuensi keluaran dari generator, kemudian mencocokkan dengan tegangan dan frekuensi sistem yang sudah bekerja secara otomatis, setelah cocok memberikan sinyal penutupan ke MCCB generator sehingga bergabung dalam operasi paralel. Untuk mencocokkan tegangandan frekuensi dapat dilihat dalam satu panel sinkron yang digunakan bersama untuk beberapa generator dimana masing-masing panel generator mempunyai saklar sinkron disamping SPM-nya.

Setelah generator beroperasi secara paralel, generator dengan alat pembagi bebannya selalu merespon secara aktif segala tindakan kenaikan atau penurunan

beban listrik, sehingga masing-masing generator menanggung beban dengan presentasi yang sama diukur dari kemampuan masing-masing (Arifai, 2017).

2.6 Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan

Terdapat beberapa gangguan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik yang dapat mengganggu kestabilan dari suatu sistem. Berikut merupakan beberapa gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem.

2.6.1 Gangguan Akibat Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan suatu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan ini dapat terjadi karena beberapa hal diantaranya akibat sambaran petir, kebocoran isolasi dan kerusakan peralatan. Gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan hal yang sangat merugikan karena dapat mengalirkan arus yang sangat besar pada titik hubung singkat. Aliran arus yang besar ini membuat sistem menjadi tidak stabil. Jika peralatan yang terdapat pada titik gangguan tidak dapat menahan lonjakan arus yang besar tersebut maka akan menyebabkan kerusakan yang berkelanjutan pada tiap peralatan lain. Arus besar yang mengalir menuju titik gangguan merupakan arus kontribusi dari generator dan motor yang terhubung pada sistem (Saadat, H., 2002).

2.6.2 Gangguan Akibat Starting Motor

Pada suatu sistem yang memiliki motor dengan daya yang besar, sangat perlu untuk memperhatikan sistem starting motor tersebut. Starting motor dapat mengakibatkan lonjakan arus yang besar hingga 4x atau 6x dari arus nominalnya. Kenaikan arus ini berlangsung sampai motor mencapai 80% dari kecepatan sinkronnya. Kenaikan arus yang besar dapat membuat tegangan menjadi drop sehingga mengganggu kestabilan sistem. Drop tegangan yang terjadi terus-menerus dapat mengurangi umur dari peralatan yang digunakan. Oleh karena itu dibutuhkan metode starting yang tepat untuk menjaga kestabilan sistem (Saadat, H., 2002).

2.6.3 Gangguan Akibat Penambahan Beban Secara Tiba-tiba

Penambahan beban secara tiba-tiba dapat dikategorikan sebagai gangguan apabila beban yang ditambahkan melebihi batas kemampuan dari pembangkit.

Penambahan beban kecil yang beresilasi terus menerus juga dapat mempengaruhi kinerja generator. Penambahan beban secara tiba-tiba dapat membuat arus yang mengalir akan menjadi naik secara tiba-tiba dan membuat tegangan dan frekuensi menjadi menurun dengan cepat. Keadaan ini dapat membuat sistem jadi kehilangan sinkronisasi antar peralatan. Pada sisi generator, daya output yang dikeluarkan generator akan lebih besar dari pada masukan daya mekanis dari penggerak generator. Berkurangnya putaran generator dapat membuat frekuensi menurun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil (Rusilawati, 2015).

2.7 Standar batas Operasi Tegangan

Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) adalah Badan Usaha Milik Negara Indonesia yang ditunjuk sebagai satu-satunya badan klasifikasi nasional untuk melakukan pengkelasan kapal niaga berbendera Indonesia maupun asing yang secara reguler beroperasi di perairan Indonesia. Kegiatan klasifikasi BKI merupakan pengklasifikasian kapal berdasarkan konstruksi lambung, mesin dan listrik kapal dengan tujuan memberikan penilaian teknis atas layak tidaknya kapal tersebut untuk berlayar. Dalam penentuan tegangan dan frekuensi pada sistem distribusi daya, BKI memiliki standar mengenai batas tegangan operasi yang harus dipenuhi pada BKI Volume IV tentang peraturan instalasi listrik di kapal. terdapat standar pada kondisi operasi kapal untuk penggunaan distribusi sistem peralatan AC & DC seperti pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1 Standar Variasi Tegangan dan Frekuensi Sistem Distribusi AC

Quantity in Operation	Variations	
	Permanent	Transient
Frequency	+/- 5%	+/- 10% (5sec)
Voltage	+6% - 10%	+/- 20% (1,5 sec)

Sumber : BKI Vol. IV (2002)

Tabel 2 Standar Variasi Tegangan Sistem Distribusi DC

Parameters	Variations
Voltage tolerance (continous)	+/- 10%
Voltage cyclic variation deviation	5%
Voltage ripple (a.c.r.m.s over steady d.c voltage)	10%

Sumber : BKI Vol. IV (2002)

2.8 Software ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

1. Analisa aliran daya (*Load Flow*)
2. Analisa hubung singkat (*Short Circuit*)
3. *Arc Flash Analysis*
4. Analisa kestabilan transien, dll.

Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua

standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda.



Gambar 10 Elemen standar ANSI

Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah :

a. Generator

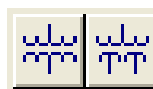
Merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 11 Simbol Generator di ETAP

b. Transformator

Berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.



Gambar 12 Simbol Transformator di ETAP

c. Pemutus Rangkaian

Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek.



Gambar 13 Simbol Pemutus Rangkaian di ETAP

d. Beban

Di ETAP terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan bebandinamis.

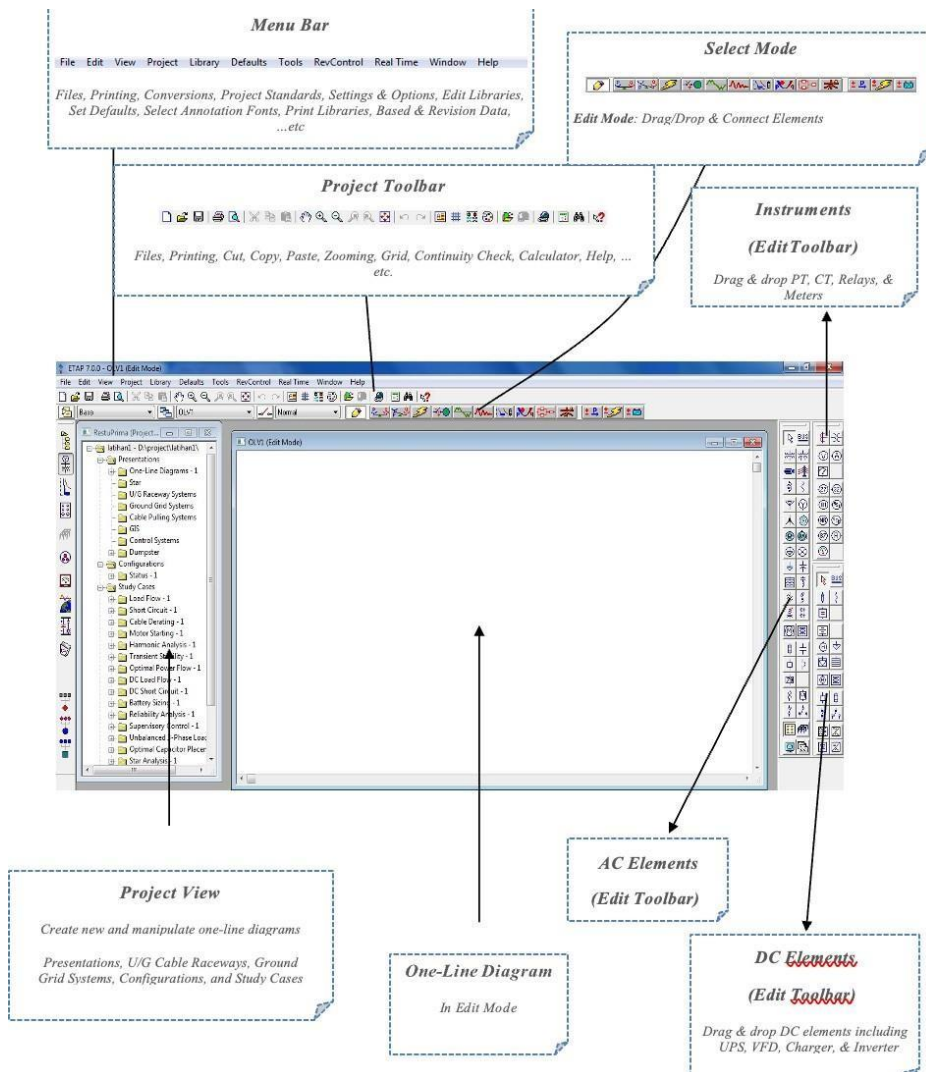


Gambar 14 Simbol Beban Statis di ETAP

2.8.1 Memulai Menjalankan Etap

Cara memulai menjalankan ETAP 12.6.0 adalah sebagai berikut :

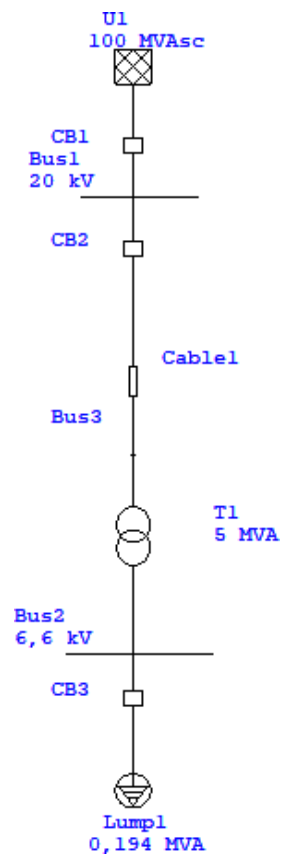
1. Instal aplikasi ETAP 12.6.0 (Dikirm melalui di google drive)
2. Buka aplikasi ETAP yang telah terinstal
3. Setelah aplikasi terbuka, klik menu File lalu pilih New untuk membuat lembar kerja baru.
4. Setelah itu, akan muncul lembar kerja baru dilayar anda seperti gambar 2.15



Gambar 15 Lembar Kerja

5. Setelah itu klik Project untuk mengatur standard (IEC atau ANSI) dan tulis nama anda sebagai engineer dari projek yang akan anda buat di ETAP.
6. Setelah itu, rangkailah single line diagram sederhana.

2.8.2 Rangkaian Percobaan



Gambar 16 Rangkaian Percobaan One Line Diagram Sederhana