TUGAS AKHIR – EE 184801

PERBANDINGAN METODE INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI

Baharuddin Aulia Ma'ruf
NRP 07111640000120

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – EE 184801

PERBANDINGAN METODE INTEGRASI P*OWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI

Baharuddin Aulia Ma'ruf
NRP 07111640000120

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PROJECT – EE 184801

COMPARISON OF POWER SYSTEM ISLAND INTEGRATION METHOD IN CONSIDERATION WITH RELIABILITY, ECONOMY, AND FLEXIBILITY OF OPERATION

Baharuddin Aulia Ma'ruf
NRP 07111640000120

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Sepuluh Nopember Institue of Technology
Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**PERBANDINGAN METODE INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI"** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabava. Juli 2020

Baharuddin Aulia Ma'ruf

07111640000120

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERBANDINGAN METODE INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Tekonologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 196603181990101001

SURABAYA
JULI, 2020

PERBANDINGAN METODE INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Tekonologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

SURABAYA
JULI, 2020

PERBANDINGAN METODE INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND* DENGAN PERTIMBANGAN KEANDALAN, EKONOMI, DAN FLEKSIBILITAS OPERASI

Nama : Baharuddin Aulia Ma'ruf
Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRAK

Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan ekonomi, setiap industri harus melakukan peningkatan secara bertahap dan berkelanjutan terhadap kapasitas produksi agar mampu bersaing di era globalisasi saat ini. Sejalan dengan hal tersebut, terdapat berbagai hal yang harus selalu ditingkatkan, termasuk peralatan dan mesin pendukung proses industri. Sehingga suatu industri dalam operasionalnya juga membutuhkan peningkatan konsumsi energi listrik. Seiring penigkatan kebutuhan listrik dan penambahan beban, maka industri membutuhkan sistem kelistrikan baru yang perlu diintegrasikan pada sistem kelistrikan yang telah ada. Untuk mengintegrasikan sistem baru ke dalam sistem yang telah ada, terdapat beberapa opsi yang dapat digunakan. Dimana setiap opsi tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan baik dalam segi keandalan, ekonomi, maupun biaya investasi. Dalam tugas akhir ini akan dibahas analisis perbandingan metode dalam mengintegrasikan *power system island* dengan mempertimbangkan beberapa faktor. Faktor-faktor yang dibandingkan diantaranya yaitu keandalan, besar rugi-rugi aliran daya, nilai ketahanan peralatan, fleksibilitas operasi, dan modal investasi. Pada penelitian ini dipilih sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur yang merupakan perusahaan besar petrokimia di Indonesia sebagai objek observasi dalam membandingkan metode integrasi *power system island.* Sehingga diharapkan dapat menjadi acuan dalam penentuan metode integrasi *power system island* yang handal, ekonomis, dan memiliki fleksibilitas operasi.

Kata kunci: Integrasi, *Power System Island*, Keandalan, Modal Investasi, Fleksibilitas Operasi, *Substation.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

COMPARISON OF POWER SYSTEM ISLAND INTEGRATION METHOD IN CONSIDERATION WITH RELIABILITY, ECONOMY, AND FLEXIBILITY OF OPERATION

Name : Baharuddin Aulia Ma'ruf
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRACT

Along with economic growth, each industry must expanding production to be able to compete in the era of globalization. In line with this, there are various things that must be added, including equipment and machinery that support industrial processes. Requiring an industry in its operations also requires an increase in electricity consumption. For increasing electricity and load requirements, the industry needs a new electricity system that needs to be integrated in the existing electricity system. To integrate a new system into an existing system, several options are available that can be used. Where each option supports this has advantages and disadvantages in terms of reliability, economy, and investment costs. In this final project, will be analyzed method to integrating power system island in the main system and will be discussed by considering several factors. Factors to be compared are reliability, power losses, equipment capability, flexibility of operation, and investment capital cost. In this study, the electrical system PT. Pupuk Kalimantan Timur *which is a large petrochemical company in Indonesia as an object of observation in comparing power system island integration methods. So that it is expected to be a reference in determining the island power system integration method that is reliable, economical, and has flexibility of operation.*

Keywords: Integration, Power System Island, Reliability, Capital Investment Cost, Flexibility of Operation, Substation.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillaahi Robbil 'Alamin. Puji syukur Penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Allah SWT yang telah memberikan kekuatan fisik, mental serta memberikan kelancaran dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Helmi Kaharun S.T. dan Ibu Novita Rachmawati, yang selalu memberikan doa serta dukungan tanpa henti.
3. Adik saya Tsabita Aulia Rakhmah, yang selalu memberikan semangat dan doa.
4. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
6. Seluruh rekan Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) ITS atas segala dukungan, bantuan, kebersamaan, dan kerjasamanya.
7. Teman-teman seperjuangan angkatan e56 atas dukungan dan kerja samanya selama masa kuliah hingga penyusunan Tugas Akhir ini
8. Mas Vincentius Raki selaku mentor penulis yang banyak memberi saran kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kesalahan pada penyusunan penelitian, penulis mengharapkan adanya saran dan kritik yang membangun untuk menyempurnakan penelitian.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
PERNYATAAN KEASLIAN
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 2
1.4 Batasan Masalah 2
1.5 Metodologi 3
1.6 Sistematika Penulisan 4
1.7 Relevansi 5
BAB II INTEGRASI SISTEM TENAGA LISTRIK **7**
2.1 *Power Substation* 7
2.2 Konfigurasi Busbar 7
2.2.1 *Sectionalized Single Bus* 7
2.2.2 *Double Breaker Double Bus* 8
2.2.3 *One and Half Breaker* 9
2.2.4 *Ring bus* 9
2.2.5 *Mesh* 10
2.3 *Power System Island* 11
2.4 Analisa Aliran Daya 12
2.4.1 Daya Nyata 12
2.4.2 Daya Aktif 13
2.4.3 Daya Reaktif 13
2.5 Analisa Hubung Singkat 13
2.5.1 Klasifikasi Hubung Singkat 14
2.5.2 Perhitungan dan Evaluasi Kemampuan Peralatan HVCB (*Device Capability*) 15
2.6 Analisis Kontingensi dengan Metode Aliran Daya 16
2.7 *Techno-economic planning* Sistem kelistrikan 17
2.7.1 *Investmen Cost* 17

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR (PKT) DAN PEMODELAN KONFIGURASI INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND*.....19
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur 19
3.1.1 Pembangkitan dan Pembebanan PT. Pupuk Kalimantan Timur ...20
3.1.2 Sistem Distribusi PT . Pupuk Kalimantan Timur 21
3.2 Pemodelan Metode Integrasi *Power System Island* 24
3.2.1 *Sectionalized Single Bus* 25
3.2.2 *Double Breaker Double Bus*.....25
3.2.3 *One and half breaker* 26
3.2.4 *Ring Bus*.....27
3.2.5 *Mesh* 28
3.2.6 *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi 29
3.2.7 *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi.....30
3.2.8 *Mesh* dengan Trafo Isolasi 31
BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA 33
4.1 Analisis Aliran Daya Kondisi Operasi Normal 33
4.1.1 Transfer Daya Kondisi Operasi Normal.....33
4.1.2 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Kondisi Operasi Normal.....58
4.1.3 Perbandingan Profil Tegangan Kondisi Operasi Normal 58
4.2 Analisis Kontingensi.....60
4.2.1 Skema Kontingensi.....60
4.2.2 Transfer Daya Maksimum.....71
4.2.3 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Setelah Dilakukan Kontingensi...80
4.2.4 Perbandingan Profil Tegangan Setelah Dilakukan Kontingensi ...80
4.3 Analisis Hubung Singkat 82
4.3.1. Analisis Hubung Singkat untuk Busbar 83
4.3.2 Analisis Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB).....84
4.4 Perbandingan Biaya Investasi Antar Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan.....90
4.5 Analisis Perbandingan Metode Integrasi *Power System Island*.....92
BAB V PENUTUP 97
5.1 Kesimpulan 97
5.2 Saran.....97
DAFTAR PUSTAKA.....99
BIODATA PENULIS 101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 *Single Line Diagram* Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* 8
Gambar 2.2. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Double Breaker Double Bus*.....8
Gambar 2.3. *Single Line Diagram* Konfigurasi *One and Half Breaker* 9
Gambar 2.4. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Ring Bus*.....10
Gambar 2.5. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Mesh*.....11
Gambar 3.6. *Single Line Diagram* Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur 19
Gambar 3.7. *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus.* 25
Gambar 3.8 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus*.....26
Gambar 3.9 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus.* 27
Gambar 3.10 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus*.....28
Gambar 3.11 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh.* 29
Gambar 3.12 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi. 30
Gambar 3.13 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi. 31
Gambar 3.14 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi. 32
Gambar 4.15 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Operasi Normal. 34

Gambar 4.16 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Operasi Normal. 35
Gambar 4.17 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Operasi Normal.....37
Gambar 4.18 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Operasi Normal.....38
Gambar 4.19 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Operasi Normal. 40
Gambar 4.20 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Operasi Normal. 41
Gambar 4.21 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Operasi Normal. 43
Gambar 4.22 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Operasi Normal. 44
Gambar 4.23 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Operasi Normal. 46
Gambar 4.24 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Operasi Normal. 47
Gambar 4.25 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 49
Gambar 4.26 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 50
Gambar 4.27 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 52

Gambar 4.28 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 53
Gambar 4.29 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 55
Gambar 4.30 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal. 56
Gambar 4.31 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus*. 61
Gambar 4.32 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus*. 62
Gambar 4.33 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Breaker* 64
Gambar 4.34 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus*.66
Gambar 4.35 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh*..... 67
Gambar 4.36 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi..... 68
Gambar 4.37 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi. 69
Gambar 4.38 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi. 70

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kapasitas Pembangkitan Generator di PT. Pupuk Kalimantan Timur. 20
Tabel 3.2 Pembebanan pada *Bus* Utama di PT. Pupuk Kalimantan Timur 20
Tabel 3.3 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur 21
Tabel 3.4 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)..... 22
Tabel 3.5 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)..... 23
Tabel 3.6 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)..... 24
Tabel 4.7 Nilai Transfer daya Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Operasi Normal. 36
Tabel 4.8 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Operasi Normal. 39
Tabel 4.9 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Kondisi Operasi Normal. 42
Tabel 4.10 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Kondisi Operasi Normal..... 45
Tabel 4.11 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Kondisi Operasi Normal. 48
Tabel 4.12 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal. 51
Tabel 4.13 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal..... 54

Tabel 4.14 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal.....57
Tabel 4.15 Perbandingan Nilai Rugi-Rugi Daya Metode Integrasi *Power System Island* pada Kondisi Operasi Normal.....58
Tabel 4.16 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Kondisi Operasi Normal 58
Tabel 4.17 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Kondisi Operasi Normal (lanjutan).....59
Tabel 4.18 Skema Pelepasan Generator Aktif pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. 60
Tabel 4.19 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Sectionalized Single Bus*.....62
Tabel 4.20 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Double Breaker Double Bus* 63
Tabel 4.21 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *One and Half Breaker*.....65
Tabel 4.22 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Ring Bus* 66
Tabel 4.23 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Mesh* 68
Tabel 4.24 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Sectionalized Bus* dengan Trafo Isolasi 69
Tabel 4.25 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi. 70
Tabel 4.26 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Mesh* dengan Trafo Isolasi. 71
Tabel 4.27 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Kontingensi. 71
Tabel 4.28 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Kontingensi (lanjutan).....72
Tabel 4.29 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Kontingensi.....72

Tabel 4.30 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Kontingensi (lanjutan) 73
Tabel 4.31 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *one and half breaker* Kondisi Kontingensi..... 73
Tabel 4.32 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *one and half breaker* Kondisi Kontingensi (lanjutan)..... 74
Tabel 4.33 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *ring bus* Kondisi Kontingensi..... 75
Tabel 4.34 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Kondisi Kontingensi. 76
Tabel 4.35 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi. 77
Tabel 4.36 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi. 78
Tabel 4.37 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi. 79
Tabel 4.38 Perbandingan Nilai Rugi-Rugi Daya Terbesar Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi.80
Tabel 4.39 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Terendah Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi 80
Tabel 4.40 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Terendah Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi (lanjutan)..... 81

Tabel 4.41 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat pada bus sinkron utama di Tegangan 33kV Masing-Masing Metode Integrasi.....83
Tabel 4.42 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat pada bus sinkron utama di Tegangan 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan).....84
Tabel 4.43 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi 85
Tabel 4.44 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan).....86
Tabel 4.45 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan).....87
Tabel 4.46 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan).....88
Tabel 4.47 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan).....89
Tabel 4.48 Estimasi Harga Peralatan (Busbar, *Circuit Breaker*, dan Trafo Isoasi).....90
Tabel 4.49 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi Masing-Masing Metode Integrasi. 90
Tabel 4.50 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi Masing-Masing Metode Integrasi. 91
Tabel 4.51 Perbandingan Metode Integrasi *Power System Island* Berdasarkan Keandalan, Fleksibilitas Operasi, dan Ekonomi. 93
Tabel 4.52 Perbandingan Keandalan Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. 94
Tabel 4.53 Perbandingan Fleksibilitas Operasi Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. 95
Tabel 4.54 Perbandingan Nilai Ekonomi Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. 95

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini pertumbuhan ekonomi terus menigkat, hal tersebut menuntut industri untuk terus menigkatkan kapasitas produksinya. Sejalan dengan peningkatan kapasitas produksi ini mengakibatkan peningkatan dalam kebutuhan akan konsumsi energi listrik. Hal ini dikarenakan dalam operasionalnya sebagian besar peralatan atau mesin yang digunakan dalam produksi membutuhkan suplai energi listrik. Untuk mendukung sistem kelistrikan yang handal, perkembangan sistem produksi pada industri juga perlu diiringi oleh pengembangan sistem kelistrikan. Dimana, akibat dari pengembangan sistem kelistrikan ini terdapat *island* kelistrikan yang menjadi sistem baru untuk menunjang operasional pada industri tersebut dan perlu diintegrasikan pada sistem utama yang telah ada demi menunjang kontinuitas aliran daya.

Terinspirasi dari kasus yang pernah dialami oleh perusahaan PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT), yang merupakan perusahaan besar petrokimia di Indonesia. Berkembangnya sistem baru pada sistem kelistrikan, PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM), membutuhkan suatu sistem kelistrikan yang handal. [1] Sebelum dilakukan pengembangan, PT PKT memiliki 5 generator yang terletak di delapan island yang terintegrasi pada sinkron bus utama 33 kV. Dalam perkembangan, PT PKT berencana membangun pabrik baru yang terdiri dari generator dan beban di tiga area yang berbeda pada bus 33 kV. [2] Pabrik baru ini nantinya akan disebut island Tanjung Harapan (TH). Island TH terletak cukup jauh dari bus utama. Sehingga, berisiko meningkatkan besar nilai arus gangguan.[1] Dengan demikian maka diperlukan dilakukan pertimbangan dalam menentukan metode integrasi yang sesuai untuk menintegrasikan *island* TH tersebut.

Dalam mengintegraskan *power system island* baru dengan sistem yang ada terdapat beberapa konfigurasi dan metode yang dapat digunakan seperti sambungan kabel secara langsung ataupun melalui impedansi seperti transformator atau reaktor isolasi. [1] Namun opsi-opsi tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing baik dari segi keandalan, ekonomi, dan fleksibilitas operasi. Sehingga dalam menentukaan metode integrasi *power system island* baru perlu dilakukan

pertimbangan pada beberapa hal seperti besar nilai aliran daya maupun besar arus hubung singkat pada sistem untuk dapat mengetahui keandalan dan fleksibilitas operasi yang sesuai pada sitem tersebut.[3] Selain itu juga perlu dilakukan pertimbangan modal investasi untuk dapat menentukan opsi integrasi yang ekonomis. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai perbandingan metode integrasi *power system island* dengan mempertimbangkan keandalan, ekonomi dan fleksibilitas operasi.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perbandingan aliran daya, profil tegangan, rugi-rugi daya, kapasitas ketahanan peralatan, dan modal investasi tiap metode integrasi *power system island* .
2. Perbandingan keandalan, ekonomi, dan fleksibilitas operasi metode integrasi *power system island.*

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa perbandingan aliran daya, profil tegangan, rugi-rugi daya, kapasitas ketahanan peralatan, dan modal investasi tiap metode integrasi *power system island.*
2. Menengetahui metode integrasi *power system island* yang handal, ekonomis, dan memiliki feksibilitas operasional.

1.4 Batasan Masalah

Penilitian akan dibatasi oleh hal-hal dibawah ini:

1. Penilitian diterapkan pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT)
2. Peralatan yang digunakan dengan standar IEC (International Electrotechnical Commission)
3. Pemodelan metode integrasi hanya terbatas pada *Sectionalized Single Bus, Double Breaker Double Bus, One and Half Breaker, Ring Bus, Mesh, Sectionalized Single Bus* dengan trafo isolasi, *Ring Bus* dengan trafo isolasi, *Mesh* dengan trafo isolasi.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
   Mengumpulkan referensi-referensi yang mengandung informasi berkaitan dengan desain sistem, metode integrasi, *techno-economic* dari berbagai sumber referensi seperti buku, paper, serta jurnal.

2. Pengumpulan Data
   Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan untuk penentuan model sistem yang sesuai dengan single line diagram PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT). Data yang dibutuhkan berupa data-data seperti rating generator, transformator, beban, *circuit breaker*, bus, kabel, serta *single line diagram* PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT)

3. Pemodelan Sistem
   Data-data terkait akan digunakan untuk memodelkan *single line diagram* PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT) degan metode integrasi yang telah ditentukan untuk selanjutnya dapat diidentifikasi.

4. Simulasi
   Tahap ini berisi proses analisis dan simulasi *Load Flow,* Kontingensi (N-1), dan *Short Circuit* dengan menggunakan software ETAP. Simulasi *load flow* digunakan untuk membandingkan nilai transfer daya, profil tegangan dan rugi-rugi tiap opsi integrasi. Simulsi Kontingensi (N-1) digunakan untuk membandingkan tingkat keandalan tiap metode integrasi. Simulasi *short circuit* digunakan untuk menentukan kapasitas peralatan-peralatan yang terpasang untuk perhitungan investasi peralatan.

5. Perhitungan Modal Investasi
   Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan biaya modal investasi untuk setiap opsi integrasi berupa *bill of quantity / bill*

of material dari peralatan yang dibutuhkan tiap metode integrasi *power system island.*

6. Analisis Data dan Hasil Simulasi
   Memberikan kesimpulan mengenai analisis perbandingan hasil simulasi dan perhitungan modal investasi sebagai solusi dari permasalahan yang ada.

7. Penulisan
   Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian tugas akhir ini. Juga dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1: **Pendahuluan**
Bab ini menguraikan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi atau manfaat.

Bab 2: **Integrasi Sistem Tenaga Listrik**
Bab ini menguraikan tentang dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

Bab 3: **Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT) dan Pemodelan Metode Integrasi *Power System Island***
Bab ini menguraikan tentang kondisi sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT) dan pemodelan metode integrasi *power system island.*

Bab 4: **Hasil Simulasi dan Analisa Data**
Bab ini menguraikan tentang hasil simulasi Aliran daya, Kontingensi (N-1), dan Hubung Singkat PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT). Serta disajikan perhitungan estimasi biaya investasi.

Bab 5: **Penutup**
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai bahan pertimbangan bagi sistem kelistrikan serupa untuk pengembangan sitem kelistrikan.
2. Sebagai bahan referensi untuk pengerjaan tugas akhir dengan topik serupa bagi mahasiswa lainnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2
INTEGRASI SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 *Power Substation*

Power substation merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke beban atau untuk membagikan atau mendistribusikan tenaga listrik pada beban baik beban tegangan menengah maupun beban tegangan rendah.[4] Terdapat beberapa klasifikasi *power substation* yang mungkin digunakan dalam jaringan. Secara umum, *power substation* digunakan untuk mengontrol aliran daya dan kualitas pasokan di jaringan. Bergantung pada tugas dan tujuannya, *power substation* memiliki persyaratan, fitur, dan tata letak yang berbeda. Hal-hal ini menentukan fleksibilitas operasional, keandalan, keamanan, kemampuan menahan hubung singkat, pemeliharaan, biaya operasional dan investasi. Pemilihan *power substation* didasarkan pada analisis *case-area* dan *techno-economic*[5].

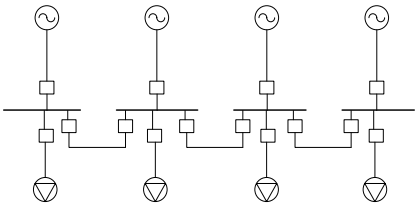
2.2 Konfigurasi Busbar

Fungsi utama bus pada *power substation* adalah untuk menerima dan mendistribusikan kembali sistem. Pemilihan konfigurasi bus tergantung pada level tegangan, posisi *power substation*, fleksibilitas yang dibutuhkan, dan biaya yang dikeluarkan. Sistem busbar yang dipilih harus mencakup penyediaan pertumbuhan beban yang diperkirakan.

Dalam praktiknya, berbagai variasi struktur busbar digunakan pada *power substation*. Masing-masing memiliki karakteristik keandalan dan fleksibilitas operasional. Beberapa memiliki keandalan dan fleksibilitas yang baik, tetapi juga memiliki biaya investasi yang tinggi. Dengan demikian, konfigurasi busbar dijelaskan sebagai berikut.

2.2.1 *Sectionalized Single Bus*

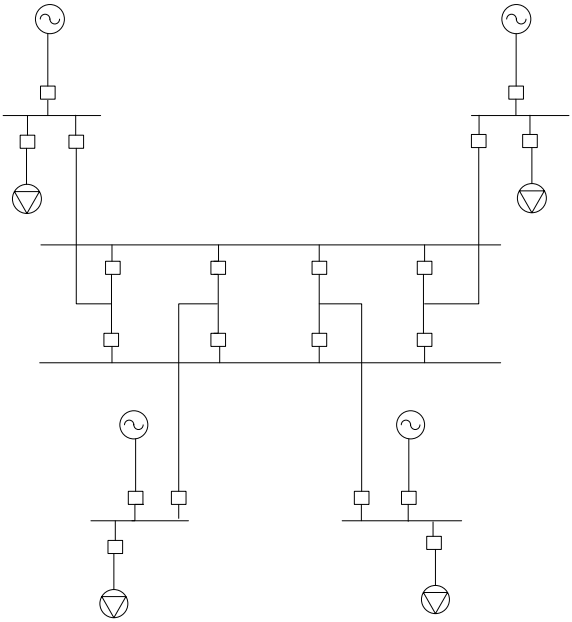
Sistem *sectionalized single bus* terdapat tambahan berupa circuit breaker untuk mengiolasi. Secara umum, ini membantu dalam mengurangi jumlah gangguan pada *substation* ketika terjadi kerusakan pada busbar, sehingga tidak menyebabkan semua *feeder* terlepas.



Gambar 2.1 *Single Line Diagram* Konfigurasi *Sectionalized Single Bus*

2.2.2 *Double Breaker Double Bus*

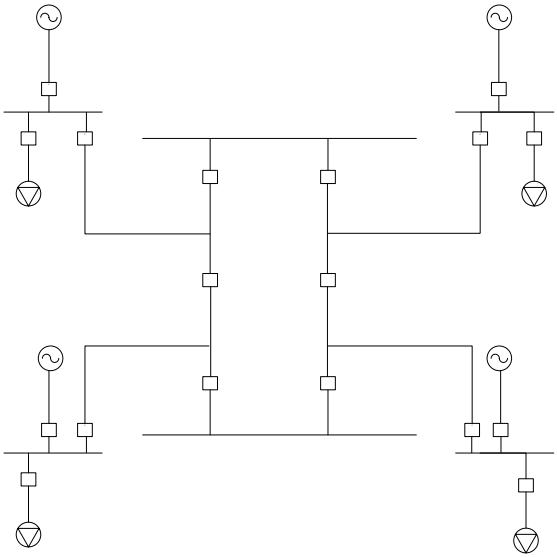
Sistem *double breaker bus* terdiri dari dua busbar yang benar-benar identik. Setiap *feeder* terhubung melalui *circuit breaker* ke kedua bus secara paralel dan setiap bus terhubung dengan *supply* dan *feeder*, sehingga ketika terjadi gangguan pada salah satu bus dapat dialihkan ke bus lain.



Gambar 2.2. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Double Breaker Double Bus*

2.2.3 *One and Half Breaker*

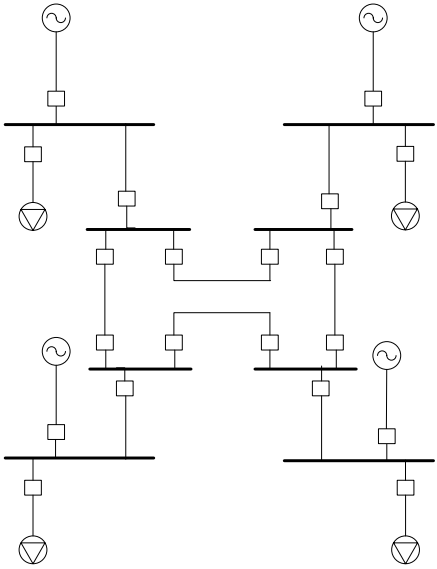
Sistem *one and a half breaker* terdiri dari dua busbar yang terhubung dengan dua *circuit breaker* dan satu *circuit breaker* cadangan yang bertindak sebagai elemen penghubung untuk dua *feeder*. Ketika terjadi kegagalan *circuit breaker* pada salah satu *feeder*, maka daya dialihkan melalui dua *circuit breaker* lainnya.



Gambar 2.3. *Single Line Diagram* Konfigurasi *One and Half Breaker*

2.2.4 *Ring bus*

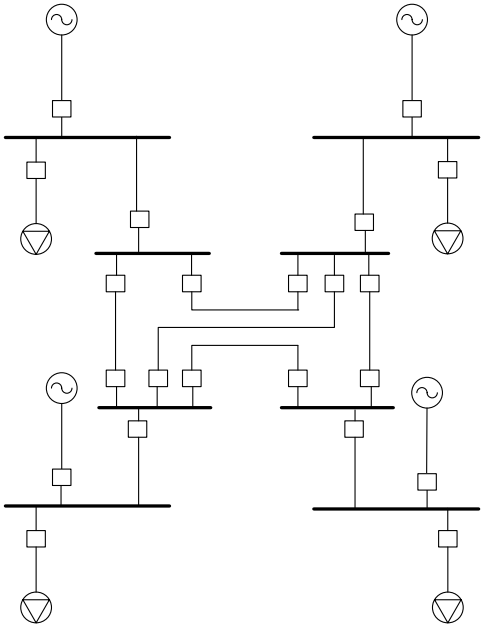
Sistem *Ring bus* merupakan terhubungnya setiap busbar melalui *sectionalizing breaker* sehingga menghasilkan loop atau ring tertutup. Untuk keandalan maksimum dan fleksibilitas operasional, setiap bus harus memiliki *supply* daya. Jika terjadi kegagalan pada salah satu *circuit breaker*, maka hanya busbar yang terjadi gangguan yang terlepas dari sistem sehingga dapat mengisolasi gangguan pada bus lainnya[5].



Gambar 2.4. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Ring Bus*

2.2.5 *Mesh*

Sistem *mesh* ini merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara terus-menerus oleh dua atau lebih *feeder* dari beberapa sumber tenaga listrik yang bekerja secara paralel. Sistem ini merupakan pengembangan dari sistem-sistem yang terdahulu dan merupakan sistem yang paling baik serta dapat diandalkan, mengingat sistem ini dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik. Selain itu jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik *feeder*. Sistem busbar ini dioperasikan oleh empat *circuit breaker*. Jika gangguan terjadi pada bagian mana pun, dua *circuit breaker* menjadi terbuka dan mengisolasi gangguan[6].



Gambar 2.5. *Single Line Diagram* Konfigurasi *Mesh*

2.3 *Power System Island*

Sistem *islanding* pada kelistrikan merupakan suatu kondisi dimana generator tidak terhubung dengan grid, sehingga generator mendapatkan titik netral dari sistemnya sendiri dan dapat tetap menyuplai aliran daya pada beban disekitarnya walaupun tidak terhubung pada grid. *Islanding* juga merupakan suatu kondisi di mana sistem tenaga terbagi menjadi beban dan pembangkitan setelah beroperasinya *circuit breaker* pada transmisi, *circuit breaker* pada *substation* atau *feeder*, *line recloser* atau *line fuses*. *Islanding* juga dapat menyebabkan kedip tegangan, peningkatan pembangkitan sistem atau kesalahan koordinasi peralatan pengaman jika terjadi kesalahan saat *islanding*. Dalam sebuah sistem kelistrikan biasanya terdiri atas satu atau lebih *island* kelistrikan[7].

2.4 Analisa Aliran Daya

Dalam studi analisa aliran daya didapat beberapa kegunaan antara lain[6] :

- Untuk mengetahui setiap tegangan pada sinyal yang ada dalam sistem.
- Untuk mengetahui semua peralatan, apakah memenuhi batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
- Untuk mengetahui kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.
- Pada hubung singkat, stabilitas pembebanan ekonomis.

Daya listrik akan selalu mengalir ke beban, karenanya dalam hal ini aliran dayanya juga merupakan aliran beban. Pada dasarnya beban dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu beban statis dan beban dinamis. Pada setiap simpul atau bus sistem terdapat empat parameter atau besaran yaitu :

- Daya nyata (aktif)
- Daya semu (reaktif)
- Tegangan
- Sudut fasa

Dalam menganalisa aliran daya dihitung :

- Tegangan tiap bus
- Aliran daya di tiap saluran

Daya dikalsifikasikan menjadi 3 jenis yaitu :

2.4.1 Daya Nyata

Daya nyata didefinisikan dengan persamaan (2.1) berikut :

$$S = V.I$$

$$S = Vm\ cos\omega t.\ Im\cos(\omega t - \theta)$$

$$S = \frac{V_m I_m}{2} cos\theta(1 + cos2\omega t) + \frac{V_m I_m}{2} sin\theta.sin2\omega t$$

$$S = |V||I|cos\theta(1 + cos2\omega t) + |V||I|sin\theta.sin2\omega t \qquad (2.1)$$

Dimana $|V|$ dan $|I|$ adalah harga efektif dari tegangan dan arus.

2.4.2 Daya Aktif

Daya aktif didefinisikan dengan persamaan (2.2) berikut :

$$P = |V||I|cos\theta \tag{2.2}$$

Dimana P adalah daya aktif atau nyata (watt) dan cos θ adalah factor daya :

- *lagging* untuk rangkaian induktif
- *leading* untuk rangkaian kapasitif

2.4.3 Daya Reaktif

Daya Reaktif didefinisikan dengan persamaan (2.3) berikut :

$$Q = |V||I|sin\theta.sin2\omega t$$

$$Q = |V||I|sin\theta \tag{2.3}$$

Dimana Q adalah daya reaktif ,nilai Q akan positif untuk beban induktif dan negatif untuk beban kapasitif

2.5 Analisa Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan suatu hubungan abnormal terjadi secara kebetulan atau disengaja pada sistem tenaga listrik melalui impedansi yang relatif rendah antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda pada keadaan normal (IEC 60909). Istilah gangguan atau gangguan hubung singkat digunakan untuk menjelaskan suatu hubungan singkat. Penyebab hubung singkat dibedakan menjadi penyebab internal dan eksternal[6].

Secara umum analisis hubung singkat memiliki tujuan, yaitu sebagai berikut:

- Menentukan arus dan tegangan maksimum dan minimum pada bagian-bagian / titik-titik tertentu dari suatu sistem tenaga listrik untuk jenis-jenis gangguan yang mungkin terjadi.
- Menentukan nilai hubung singkat pada setiap bus atau saluran yang terhubung pada bus tersebut sehingga dapat menganalisa kapasitas alat pemutus daya dan peralatan yang digunakan.

– Dapat menentukan setting rele dan koordinasi pengaman untuk mengamankan sistem dari gangguan arus hubung singkat.

2.5.1 Klasifikasi Hubung Singkat

Untuk menghitung arus akibat hubung singkat pada sistem kelistrikan, perlu dilakukan klasifikasi terhadap tipe hubung singkat. Terdapat beberapa kejadian hubung singkat yang dikategorikan sebagai berikut :

2.5.1.1. *Hubung Singkat Simetri*

Kejadian hubung singkat dengan seluruh fasa terhubung menjadi suatu titik. Dalam sistem kelistrikan, kemungkinan kejadian ini sebesar 5%. Nilai arus kejadian hubung singkat ini merupakan yang paling besar yang dapat diformulasikan melalui persamaan (2.4) berikut:

$$I_{SC}\ 3\emptyset = \frac{V_{LN}}{X_1} \qquad (2.4)$$

Dimana V_{LN} adalah tegangan *line to neutral* dan X_1 adalah reaktansi positif.

2.5.1.2. *Hubung Singkat Tidak Simetri*

Kejadian dimana antar fasa pada suatu sistem bertemu dalam suatu titik dan mengakibatkan arus hubung singkat. Pada kondisi nyata hubung singkat dua fasa memiliki persentase kejadian sebesar 15%. Nilai hubung singkat dua fasa ini sering disebut dengan arus hubung singkat minimum karena banyaknya jumlah impedansi yang berpengaruh:

$$I_{SC}\ 2\emptyset = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2}$$

Dimana V_{LL} adalah tegangan line to line dan X_2 adalah reaktansi urutan negatif. Jika X_1 sama dengan X_2 maka:

$$I_{SC}\ 2\emptyset = \frac{\sqrt{3}.V_{LN}}{2.X_1} \qquad (2.5)$$

2.5.1.3 *Hubung Singkat Tidak simetri*

Kejadian hubung singkat yang paling sering terjadi pada sistem kelistrikan dengan persentase sebesar 80%. Hubung singkat ini terjadi saat salah satu fasa terhubung dengan tanah baik melalui permukaan peralatan maupun sentuhan dengan peralatan lain (disebut juga sebagai *ground fault*). Untuk menghitung nilai arus yang mengalir dapat digunakan persamaan berikut:

$$I_{SC}\ 1\emptyset = \frac{3\ x\ V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + Z_G}$$

Dimana Z_G adalah impedansi ke tanah. Apabila nilai Z_G minimum (mendekati nol), dan X_1 sama dengan X_2 dan X_3, maka dapat disimpulkan:

$$I_{SC}\ 1\emptyset = \frac{V_{LN}}{X_1} = I_{SC}\ 3\emptyset \qquad (2.6)$$

2.5.2 Perhitungan dan Evaluasi Kemampuan Peralatan HVCB (*Device Capability*)

Kemampuan asimetri *breaking* dan DC dihitung sebagai berikut:

$$I_{b\ Asymm} = I_{b\ symm}\sqrt{1 + 2e^{\left(-2\frac{t_{min}}{\tau}\right)}} \qquad (2.7)$$

$$I_{dc} = I_{b\ symm}\sqrt{2}e^{\frac{-t_{min}}{\tau}} \qquad (2.8)$$

Dimana,

f = frekuensi sistem

t_{min} = minimum waktu tunda

$I_{b\ symm}$ = arus hubung singkat *breaking* yang terdapat pada *nameplate* atau spesifikasi peralatan (Std. IEC 2271-100)

X/R dihitung berdasarkan pada pengujian faktor daya dengan dasar IEC Standard 60947-2

Dari nilai level hubung singkat dan data kemampuan peralatan maka evaluasi peralatan yang sudah terpasang dapat dilakukan. Sedangkan untuk perencanaan, dapat ditentukan peralatan yang mempunyai rating hubung singkat lebih besar dari level hubung singkat pada setiap bus atau *switchgear*.

2.6 Analisis Kontingensi dengan Metode Aliran Daya

Analisis kontingensi dengan metode aliran daya digunakan untuk[8] mengetahui pengaruh gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik baik gangguan yang terjadi merupakan gangguan tunggal (*single contingencies*) atau gangguan jamak (*multiple contingencies*) pada saluran transmisi terhadap besarnya tegangan pada bus dan sudut fasa tegangan, serta perubahan aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan perhitungan dan kecepatan komputsi yang baik. Metode ini dikembangkan untuk mensimulasikan berbagai gangguan kontingensi, kondisi kontingensi ini dapat menyebabkan terjadinya perubahan besaran tegangan bus dan sudut fasa tegangan serta aliran daya yang terjadi pada sistem. Akibat perubahan ini maka akan menentukan unjuk kerja dari sistem yang memungkinkan terjadinya kondisi darurat. Tujuan dari analisis ini adalah :

- Mengetahui apakah sistem beroprasi secara andal dan ekonomis pada tingkat tegangan dan frekuensi yang dipertahankan dalam batas-batas yang telah ditentukan.
- Mengetahui bahwa komponen-komponen sistem seperti generator dan saluran transmisi tidak beroprasi pada kondisi beban lebih yang terus menerus.
- Membantu dalam melakukan studi kontingensi jika saluran transmisi mengalami gangguan dan keluar dari sistem, yang berakibat pada perubahan tegangan pada bus-bus yang terkait dan kemungkinan pembebanan berlebih pada saluran transmisi yang dapat menyebabkan pemadaman bertingkat yang berakhir dengan pemadaman total.

Grainger dan Stevenson memperkenalkan analisis kontingensi dengan aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson Y bus untuk menyelesaikan analisis kontingensi tunggal (*single contingencies*) dan kontingensi jamak (*multiple contingencies*) pada saluran transmisi terhadap perubahan tegangan bus dan sudut fasa tegangan dan dapat

menyelesaikan dengan memuaskan komputasi numeris analisis kontingensi pada sistem tenaga listrik. Metode ini mempertimbangkan daya reaktif, tetapi perubahan daya reaktif tergantung dari perubahan besarnya tegangan, hal ini juga berlaku untuk perubahan daya aktif yang dilakukan dengan perubahan sudut fasa. Analisis aliran daya dengan menggunakan metode Newton-Raphson selalu dilakukan dengan pemeriksaan matriks Jacobian dalam setiap iterasi dan memiliki konvergensi kuadratik sehingga waktu penyelesaiannya cukup banyak, namun akurasinya cukup baik[8].

2.7 *Techno-economic planning* Sistem kelistrikan

Tujuan utama analisis *techno-economic* adalah untuk mencari solusi terbaik dan menciptakan strategi jangka panjang untuk sistem kelistrikan untuk dapat diaplikasikan. Semua kemungkinan harus dipertimbangkan, salah satu kriteria utama yang perlu dievaluasi adalah tingkat keandalan suatu sistem. Hal tersebut akan berpengaruh langsung pada biaya yang perlu dihitung dalam analisis *techno-economic*. Tahap akhir dalam perencanaan adalah rencana jangka panjang dengn tujuan mendapat sistem yang handal dan meminimalkan total biaya investasi[5].

2.7.1 *Investmen Cost*

Investmen cost atau modal investasi pada *power substation* mencakup seluruh biaya peralatan yang terhubung pada jaringan tersebut, seperti diantaranya biaya transformator, *switchgear*, rele pengaman, busbar, transformator arus, transformator tegangan. Selain itu juga mencakup biaya tenaga kerja dan material[5].

Dengan demikian, biaya investasi dapat dihitung sebagai jumlah yang telah disebutkan sebagai berikut:

$$c_{inv} = c_{tr} + c_{sg} + c_{con} + c_{pa} + c_{ct} + c_{pt} + c_{other} \quad (2.9)$$

Dimana,

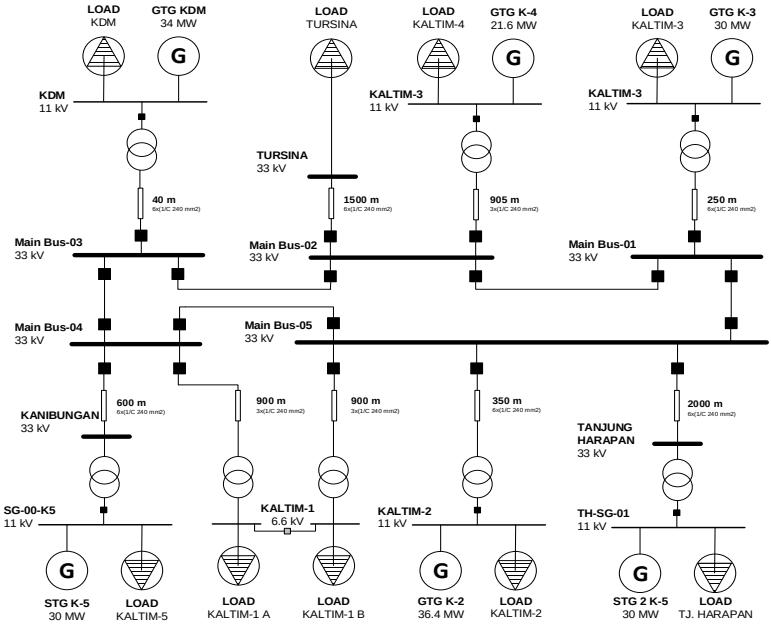
c_{tr} : Biaya transformator
c_{sg} : Biaya *switchgear*
c_{con} : Biaya sistem kontrol
c_{pa} : Biaya rele pengaman
c_{ct} : Biaya transformator arus
c_{pt} : Biaya transformator tegangan
c_{other} : Biaya tambahan lainnya

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3
SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR (PKT) DAN PEMODELAN KONFIGURASI INTEGRASI *POWER SYSTEM ISLAND*

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur secara umum memiliki 8 *island*/pabrik, yaitu: Kaltim-1, Kaltim-2, Kaltim-3, Kaltim-4, Kanibungan, Tursina, Tanjung Harapan, dan KDM yang saling terintegrasi pada suatu *ring bus* dengan tegangan 33 kV. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur ditunjukan pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.6. *Single Line Diagram* Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Demi menjaga kontinuitas aliran daya, sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dibangkitkan oleh enam generator aktif yang saling terintegrasi antar pabrik/*island* dengan level tegangan 11 kV. Sebagian besar beban yang digunakan berupa motor induksi dengan level tegangan sesuai dengan rating motor tersebut.

3.1.1 Pembangkitan dan Pembebanan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Pada operasi normal, PT Pupuk Kalimantan Timur memiliki enam unit generator yang beroperasi dan total beban listrik yang dirangkum pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Kapasitas Pembangkitan Generator di PT. Pupuk Kalimantan Timur.

Island	**ID**	**Daya Rating (MW)**	**Tegangan (kV)**	**Daya Operasi (MW)**
KALTIM-2	K2 GE	36,4	11	8,2
KALTIM-3	K3 Alsthom	30	11	10,8
KALTIM-4	K4 GENP	21,6	11	8,8
KANIBUNGAN	STG K5	30	11	14,7
KDM	KDM Alsthom	34	11	11
TANJUNG HARAPAN	STG2 K5	30	11	13

Tabel 3.2 Pembebanan pada *Bus* Utama di PT. Pupuk Kalimantan Timur

Island	**Daya Pembebanan**		
	MW	**MVAR**	**MVA**
KALTIM-1 A	6,0	2,9	6,6
KALTIM-1 B	6,0	3,0	6,7
KALTIM-2	8,2	3,8	9,1
KALTIM-3	10,5	6,5	12,4
KALTIM-4	8,8	5,1	10,1
KANIBUNGAN	14,6	9,6	17,5
KDM	11,0	4,8	12,0
TURSINA LOAD	6,0	3,8	7,1
TANJUNG HARAPAN	13,1	8,6	15,7
Total	84,2	48,1	97,2

3.1.2 Sistem Distribusi PT . Pupuk Kalimantan Timur

Sistem distribusi listrik pada PT Pupuk Kalimantan Timur, menggunakan konfigurasi *ring* bus 33 kV untuk megintegrasikan antar *island*/pabrik. Sehingga transfer daya dapat dilakukan sesuai kebutuhan operasi tiap-tiap *island*. Sistem kelistrikan didistribusikan dalam beberapa nilai tegangan yang berbeda, yaitu : 33 kV, 11 kV, 6,9 kV, 0,4kV dan 0,38 kV. Tegangan 0,4 dan 0,38 kV digunakan untuk distribusi beban berkapasitas kecil. Tegangan 6,6 kV digunakan pada distribusi beban berkapasitas besar. Tegangan 11 kV digunakan sebagai keluaran generator. Tegangan 33kV digunakan pada sistem *ring* bus yang berfungsi untuk meningkatkan keandalan sistem. Untuk mengkonversi tegangan tersebut, terdapat transformator distribusi yang dirangkum pada tabel 3.1. berikut :

Tabel 3.3 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur

ID	Area	MVA	kV	%Z	Hubungan
T136	Kaltim-1A	15	33/6,6	10	Y/Δ
T178	Kaltim-1A	0,5	6,6/0,38	4	Δ/Y
T137	Kaltim-1A	1	6,6/0,38	5	Δ/Y
T177	Kaltim-1A	1	6,6/0,5	5	Δ/Y
T138	Kaltim-1A	2	6,6/0,5	6,25	Δ/Y
T180	Kaltim-1A	2	6,6/0,5	6,25	Δ/Y
T135	Kaltim-1A	2	6,6/0,5	6,25	Δ/Y
T 1523-1	Kaltim-1A	0,036	0,5/0,38	4	Δ/Y
T 1523-2	Kaltim-1A	0,036	0,5/0,38	4	Δ/Y
T 1523-3	Kaltim-1A	0,036	0,5/0,38	4	Δ/Y
T 1523-4	Kaltim-1A	0,036	0,5/0,38	4	Δ/Y
TR RECT UNIT 2	Kaltim-1A	0,5	6,6/0,081	4	Δ/Y
T182	Kaltim-1B	15	33/6,6	10	Y/Δ
T167	Kaltim-1B	1	6,6/0,38	4	Δ/Y
T157	Kaltim-1B	0,5	6,6/0,38	4	Δ/Y
T166	Kaltim-1B	0,25	6,6/0,38	4	Δ/Y
T155	Kaltim-1B	0,5	6,6/0,38	4	Δ/Y
T156	Kaltim-1B	1	6,6/0,38	5	Δ/Y
T154	Kaltim-1B	1	6,6/0,38	5	Δ/Y

Tabel 3.4 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)

ID	Area	MVA	kV	%Z	Hubungan
T165	Kaltim-1B	0,5	6,6/0,081	4	Δ/Y
T 3612-1	Kaltim-1B	1,6	6,6/0,5	12,5	Δ/Y
T 3525-1	Kaltim-1B	0,1	0,5/0,38	4	Δ/Y
T 3525-2	Kaltim-1B	0,1	0,5/0,38	4	Δ/Y
K2-TR-01	Kaltim-2	25	33/11	10	Y/Δ
TR-2	Kaltim-2	15	11/6,6	10	Δ/Y
TR-3	Kaltim-2	1,5	11/0,5	5	Δ/Y
TR-4	Kaltim-2	1,5	11/0,6	5	Δ/Y
TR-5	Kaltim-2	1,5	11/6,6	5	Δ/Y
TR-6	Kaltim-2	1	11/0,4	5	Δ/Y
TR-7	Kaltim-2	0,75	11/0,5	4	Δ/Y
TR-8	Kaltim-2	5	11/6,6	6	Δ/Y
TR-9	Kaltim-2	5	11/6,6	6	Δ/Y
TR-10	Kaltim-2	1,5	11/0,5	5	Δ/Y
TR-11	Kaltim-2	5	11/6,6	6	Δ/Y
TR-12	Kaltim-2	0,5	11/0,5	5	Δ/Y
K3-TR-01	Kaltim-3	25	33/11	10	Y/Δ
52-TX-121	Kaltim-3	1,6	11/0,5	6,19	Δ/Y
52-TX-122	Kaltim-3	1,6	11/0,5	6,21	Δ/Y
52-TX-111	Kaltim-3	5	11/6,9	6,06	Δ/Y
52-TX-123	Kaltim-3	1,6	11/0,5	5,97	Δ/Y
52-TX-112	Kaltim-3	7,5	11/6,9	6,5	Δ/Y
52-TX-221	Kaltim-3	2	11/0,4	5,67	Δ/Y
52-TX-311	Kaltim-3	4,5	11/6,9	5,94	Δ/Y
TR NPK 1,2	Kaltim-3	8	11/6,9	6,5	Δ/Y
52-TX-321	Kaltim-3	2	6,9/0,5	5,94	Δ/Y
52-TX-322	Kaltim-3	0,5	6,9/0,5	5,5	Δ/Y
K4-TR-01	Kaltim-4	15	33/11	10	Y/Δ
01-TR-311	Kaltim-4	1	11/0,5	5	Δ/Y
01-TR-211	Kaltim-4	8,5	11/6,9	6	Δ/Y
02-TR-321	Kaltim-4	2,5	11/0,5	6	Δ/Y
02-TR-221	Kaltim-4	9	11/6,9	6	Δ/Y

Tabel 3.5 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)

ID	Area	MVA	kV	%Z	Hubungan
10-TR-301	Kaltim-4	2	11/0,5	6	Δ/Y
10-TR-201	Kaltim-4	7,5	11/6,9	6	Δ/Y
TR-KNB	Kanibungan	37,5	33/11	12,5	Y/Δ
01-TR-301	Kanibungan	1,2	11/0,5	7	Δ/Y
01-TR-302	Kanibungan	1,2	11/0,5	7	Δ/Y
02-TR-301	Kanibungan	2,2	11/0,5	8	Δ/Y
02-TR-302	Kanibungan	2,2	11/0,5	8	Δ/Y
00-TR-201	Kanibungan	20	11/6,9	11	Δ/Y
00-TR-202	Kanibungan	20	11/6,9	11	Δ/Y
03-TR-303A	Kanibungan	1,6	11/0,5	7	Δ/Y
03-TR-301	Kanibungan	3,125	11/0,5	9	Δ/Y
03-TR-302	Kanibungan	3,125	11/0,5	9	Δ/Y
20-TR-401	Kanibungan	0,5	11/0,4	5	Δ/Y
02-TR-303	Kanibungan	1,25	11/0,5	6	Δ/Y
01-TR-303	Kanibungan	2	11/0,5	7	Δ/Y
TH-TR-01	Tanjung Harapan	15	33/11	10	Y/Y
Trafo Coal Boiler Plant	Tanjung Harapan	16	33/11	10	Y/Δ
T191	Tanjung Harapan	37,7	33/11	13,75	Δ/Y
T190	Tanjung Harapan	0,5	11/0,5	5	Δ/Y
T8	Tanjung Harapan	3	11/0,4	9,75	Δ/Y
T6	Tanjung Harapan	3	11/6,9	9,75	Δ/Y
T3	Tanjung Harapan	4	11/6,6	9,75	Δ/Y
T29	Tursina	7,5	33/6,9	7	Δ/Y
TU-TR-01	Tursina	15	33/11	10	Y/Δ
T20	KDM	25	33/11	10	Y/Δ
TR 2500-1	KDM	2,5	11/6,6	5,5	Δ/Y
TR 1000	KDM	1	11/0,4	10	Δ/Y

Tabel 3.6 Data Tranformator distribusi pada PT. Pupuk Kalimantan Timur (lanjutan)

ID	Area	MVA	kV	%Z	Hubungan
TR 800	KDM	0,8	11/0,4	5,75	Δ/Y
TRH-1	KDM	7,5	11/6,9	6,5	Δ/Y
T52	KDM	1,25	11/0,5	5	Δ/Y
T53	KDM	1,25	11/0,5	5	Δ/Y
02-TR-201	KDM	10	11/6,9	8	Δ/Y
10-TR-201	KDM	3,75	11/6,9	4	Δ/Y
T39	KDM	0,5	6,9/0,4	4	Δ/Y
T40	KDM	1,8	6,9/0,5	6	Δ/Y
T36	KDM	0,5	6,9/0,4	4	Δ/Y
T35	KDM	1	6,9/0,5	5	Δ/Y
T34	KDM	1	6,9/0,5	5	Δ/Y
T33	KDM	0,05	0,5/0,4	4	Δ/Y
TRH-1	KDM	12	11/6,9	5,5	Δ/Y
TRH-2	KDM	2	11/0,5	6	Δ/Y
TRH-3	KDM	2	11/0,5	6,25	Δ/Y

3.2 Pemodelan Metode Integrasi *Power System Island*

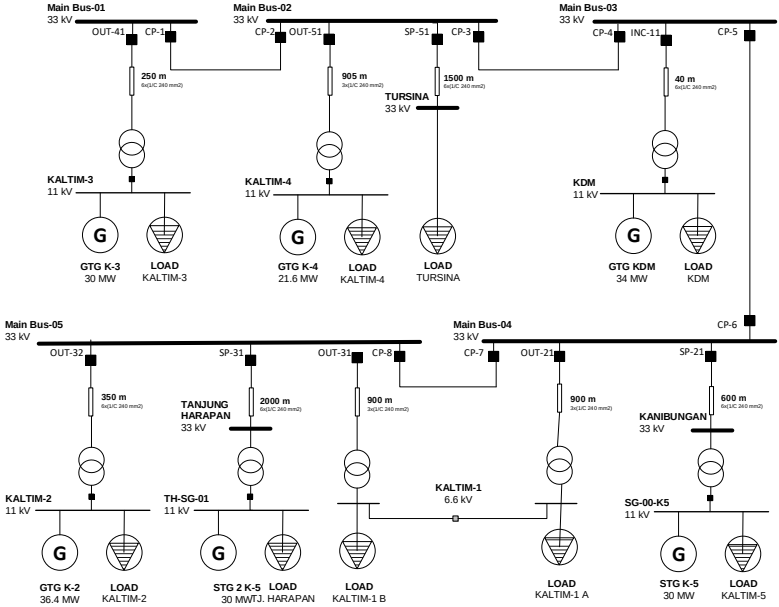
Pada tugas akhir ini akan dilakukan observasi pada 8 metode untuk mengintegrasikan masing-masing *island* sistem kelistrikan pada PT Pupuk Kalimantan, yaitu sebagai berikut:

1. *Sectionalized single bus*
2. *Double breaker double bus*
3. *One and half breaker*
4. *Ring bus*
5. *Mesh*
6. *Sectionalized single bus* dengan trafo isolasi
7. *Ring bus* dengan trafo isolasi
8. *Mesh* dengan trafo isolasi

Masing-masing konfigurasi selanjutnya akan dibandingkan untuk mengetahui karakteristik keandalan, fleksibilitas operasional dan biaya investasi dari tiap konfigurasi. Berikut merupakan detail setiap konfigurasi yang digunakan pada tugas akhir ini:

3.2.1 *Sectionalized Single Bus*

Pada konfigurasi *sectionalized single bus* terdapat tambahan berupa *circuit breaker coupler* yang menghubungkan antar bus utama 33kV. Secara umum, *circuit breaker* ini membantu dalam mengisolasi gangguan ketika terjadi kerusakan pada salah satu busbar, sehingga dapat mempertahankan kontinuitas aliran daya pada *island* yang terhubung pada bus utama lain yang tidak terjadi gagguan. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *sectionalized single bus* ditunjukan pada gambar 3.3 berikut.

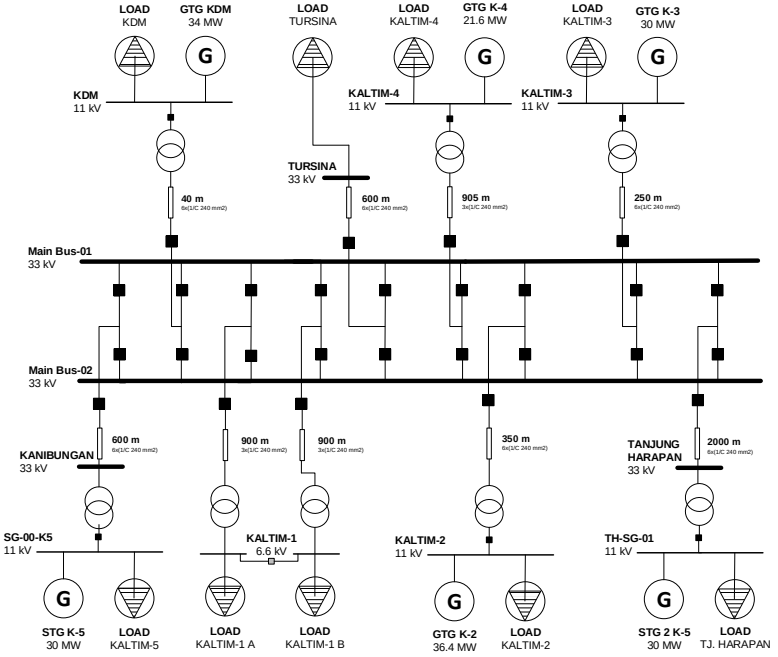


Gambar 3.7. *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus.*

3.2.2 *Double Breaker Double Bus*

Sistem *double breaker double bus* terdiri dari dua busbar utama dengan tegangan 33kV. Setiap *island* terhubung melalui *circuit breaker* ke kedua bus secara paralel. Sehingga masing-masing *island* dapat

melakukan ekspor impor daya sesuai kebutuhan operasi tiap *island* melalui kedua busbar tersebut. Ketika terjadi gangguan pada salah satu bus, kontinuitas aliran daya dapat dialihkan ke bus lain. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *double breaker double bus* ditunjukan pada gambar 3.5 berikut.

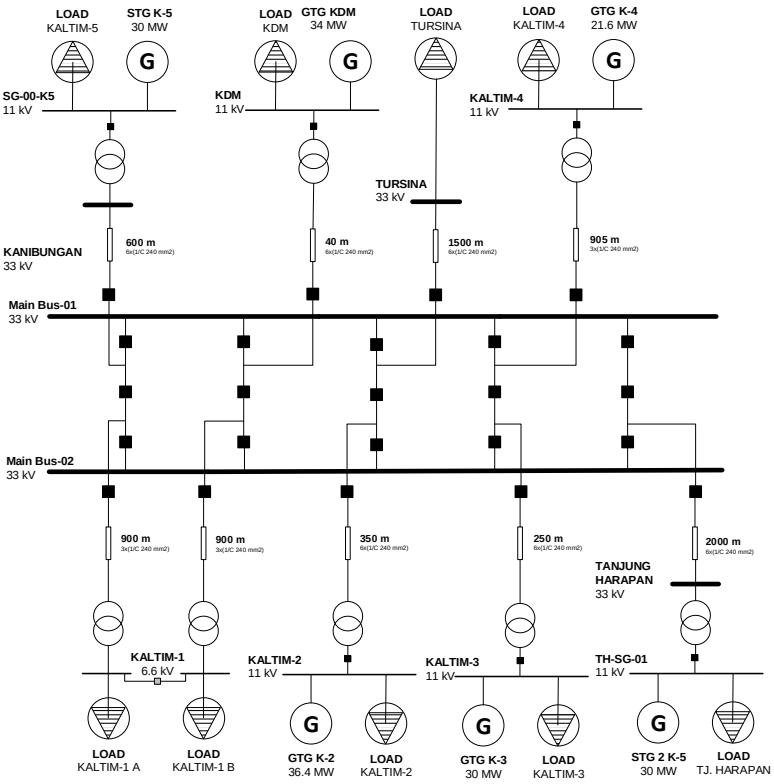


Gambar 3.8 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus.*

3.2.3 *One and half breaker*

Sistem *one and half breaker* terdiri dari dua busbar dengan tegangan 33kV yang terhubung dengan dua *circuit breaker* dan satu *circuit breaker coupler* yang bertindak sebagai elemen penghubung untuk dua *feeder*. Ketika terjadi gangguan pada salah satu *island*, maka daya dapat dialihkan melalui dua *circuit breaker* lainnya. Sistem kelistrikan PT.

Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *one and half breaker* ditunjukan pada gambar 3.6 berikut.

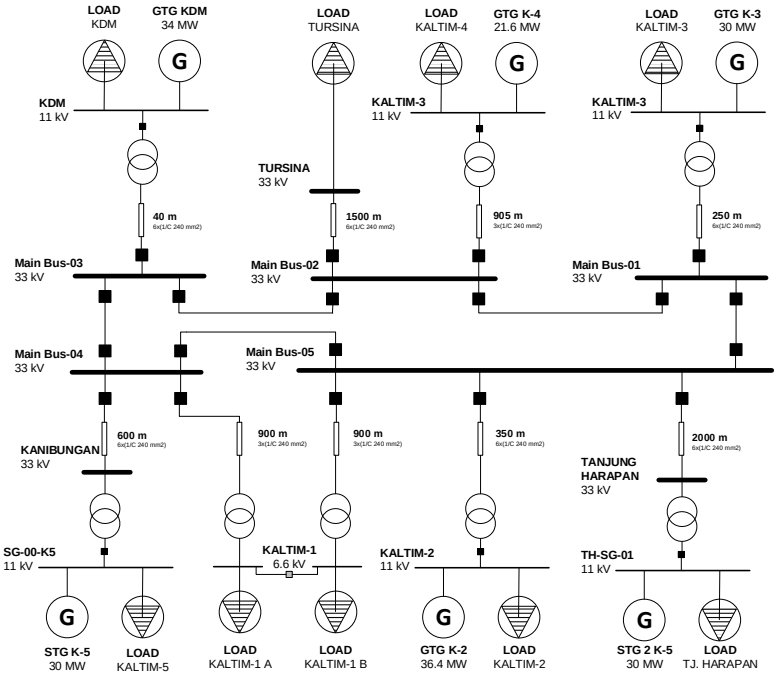


Gambar 3.9 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus.*

3.2.4 *Ring Bus*

Pada konfigurasi *ring bus* masing-masing *island* saling terhubung melalui *circuit breaker coupler* sehingga menghasilkan *loop* atau *ring* tertutup. Dengan demikian, setiap *island* dapat melakukan sinkronisasi

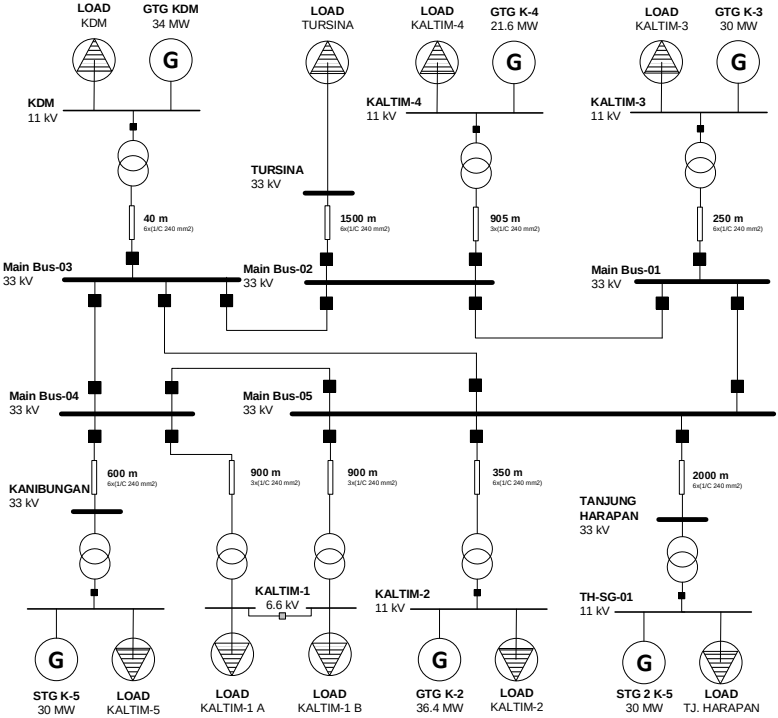
dan ekspor impor daya antar *island* melalui suatu ring bus 33kV. Jika terjadi gangguan pada salah satu *island*, maka hanya busbar yang terjadi gangguan yang terlepas dari sistem sehingga dapat mengisolasi gangguan pada bus lainnya. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *ring bus* ditunjukan pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.10 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus.*

3.2.5 *Mesh*

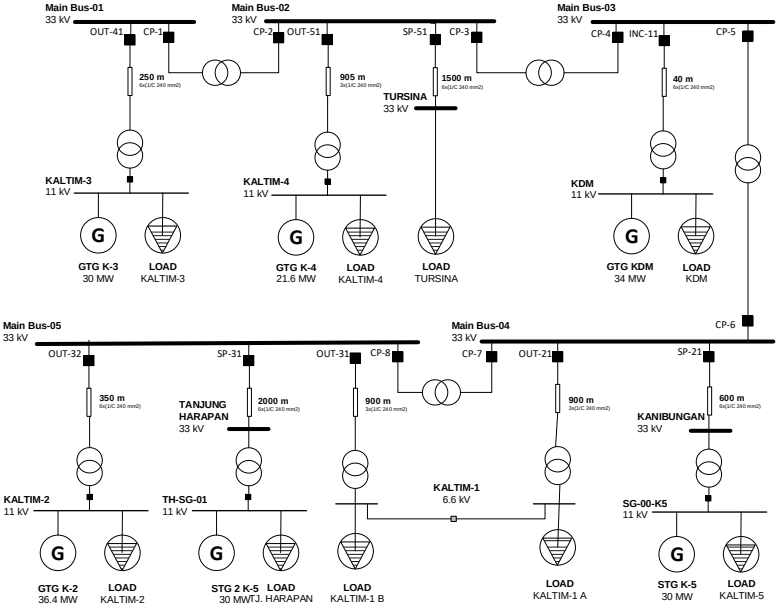
Konfigurasi *mesh* merupakan sistem yang megintegrasikan masing-masing *island* secara paralel. Jika terjadi gangguan pada busbar mana pun, kontinuitas antar *island* tetap dapat terjaga. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *mesh* ditunjukan pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.11 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh.*

3.2.6 *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi

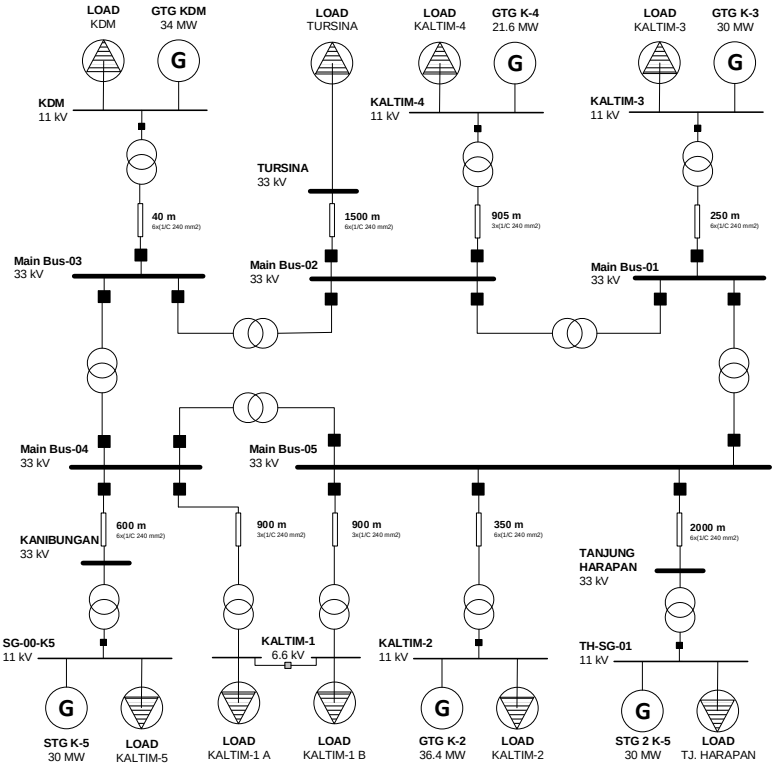
Terdapat penambahan transformator isolasi pada konfigurasi *sectionalized single bus* ini. Bus utama 33kV dipisahkan secara elektris oleh transformator isolasi dengan koneksi *delta-delta.* Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi ditunjukan pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.12 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi.

3.2.7 *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi

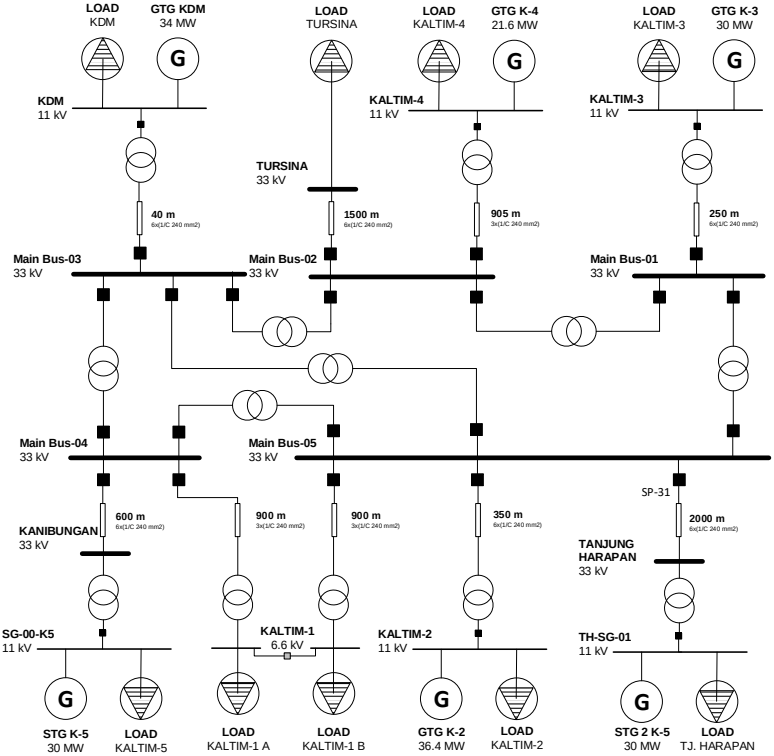
Pada konfigurasi ini setiap *island* tersinkronisasi melalui ring bus 33kV yang dipisahkan oleh transformator isolasi. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *ring bus* dengan trafo isolasi ditunjukan pada gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.13 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi.

3.2.8 *Mesh* dengan Trafo Isolasi

Pada konfigurasi ini, masing-masing *island* diintegrasikan dengan dipisahkan oleh transformator isolasi secara paralel. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *mesh* dengan trafo isolasi ditunjukan pada gambar 3.11 berikut.



Gambar 3.14 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi.

BAB 4
HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dilakukan kajian mengenai kondisi sistem dari masing-masing metode integrasi *island* kelistrikan melalui analisis aliran daya, analisis kontingensi (N-1), serta analisis hubung singkat dengan melakukan pemodelan menggunakan *software* ETAP (Electrical Transient and Analysis Program). Serta akan dilakukan perbandingan biaya investasi antara masing-masing metode integrasi.

4.1 Analisis Aliran Daya Kondisi Operasi Normal

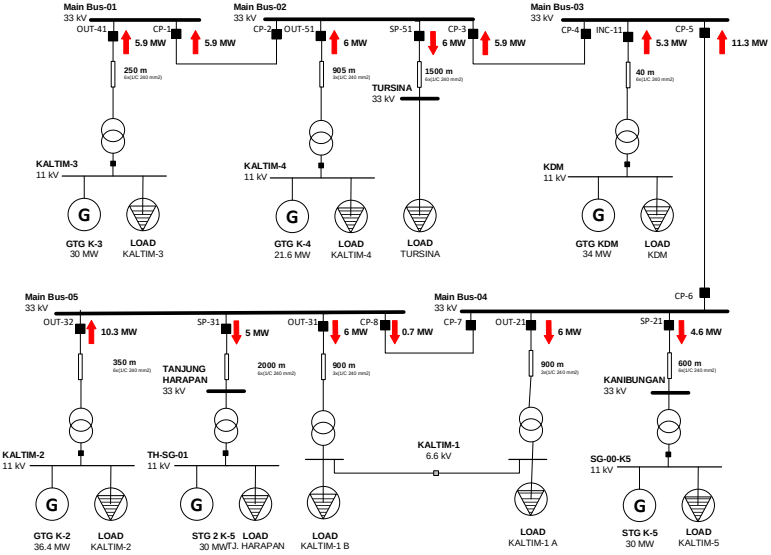
Berdasarkan pemodelan metode integrasi *island* yang telah dibuat, selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya dengan menggunakan pola operasi normal. Melalui studi aliran daya, akan didapat data berupa besar daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan, tegangan masing-masing bus saat *steady state* 3 fasa setimbang, rugi-rugi aliran daya, serta mengetahui dan merencanakan kemampuan peralatan yang ada dalam sistem berkaitan dengan kemampuan penyaluran daya.

4.1.1 Transfer Daya Kondisi Operasi Normal

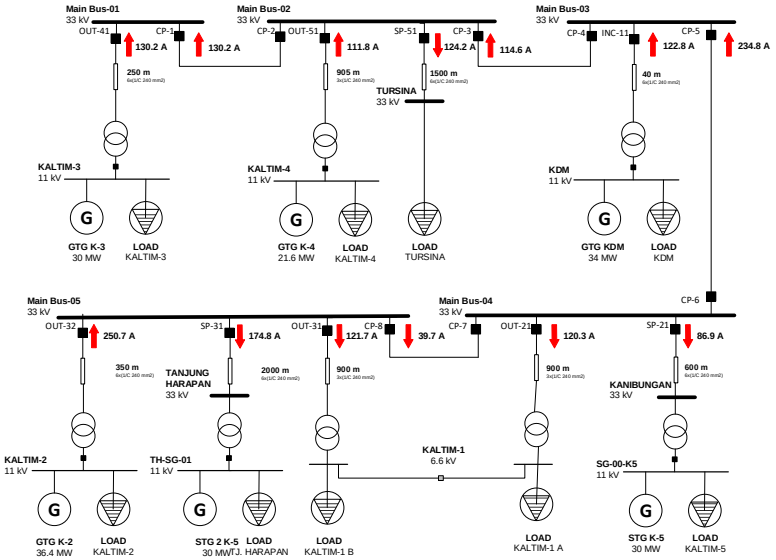
Dari hasil simulasi aliran daya pada kondisi operasi normal, didaptakan nilai besar transfer daya dari masing-masing metode integrasi *island* kelistrikan sebagai berikut.

4.1.1.1 *Sectionalized Single Bus*

Gambar 4.1 dan 4.2 merupakan hasil simulasi aliran daya sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *sectionalized single bus* dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.15 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Operasi Normal.



Gambar 4.16 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Operasi Normal.

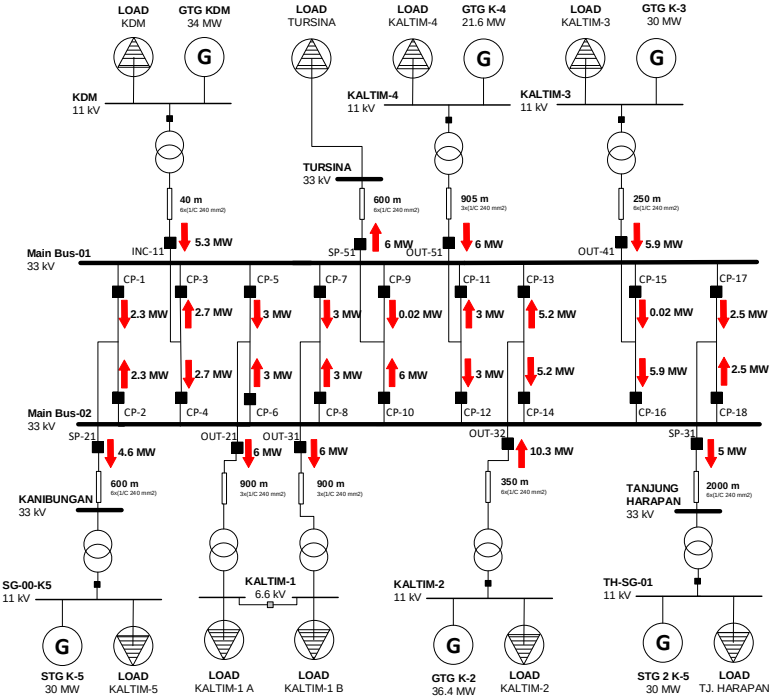
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island* dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.7 Nilai Transfer daya Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Operasi Normal.

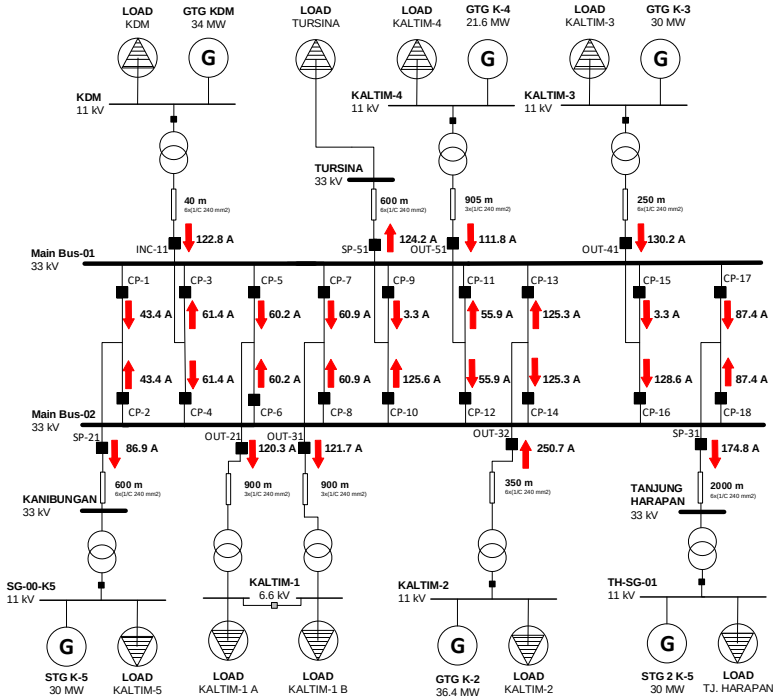
ID	Transfer daya (MW)	Arus Mengalir (A)
OUT-41	5,9	130,2
CP-1	5,9	130,2
CP-2	5,9	130,2
SP-51	6	124,2
OUT-51	6	111,8
CP-3	5,9	114,6
CP-4	5,9	114,6
INC-11	5,4	122,8
CP-5	11,3	234,8
CP-6	11,3	234,8
SP-21	4,6	86,9
OUT-21	6	120,3
CP-7	4,7	39,7
CP-8	4,7	39,7
SP-31	5	174,8
OUT-31	6	121,7
OUT-32	10,3	250,7

4.1.1.2 *Double breaker Double bus*

Gambar 4.3 dan 4.4 adalah hasil simulasi aliran daya sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *double breaker double bus* dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.17 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Operasi Normal.



Gambar 4.18 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Operasi Normal.

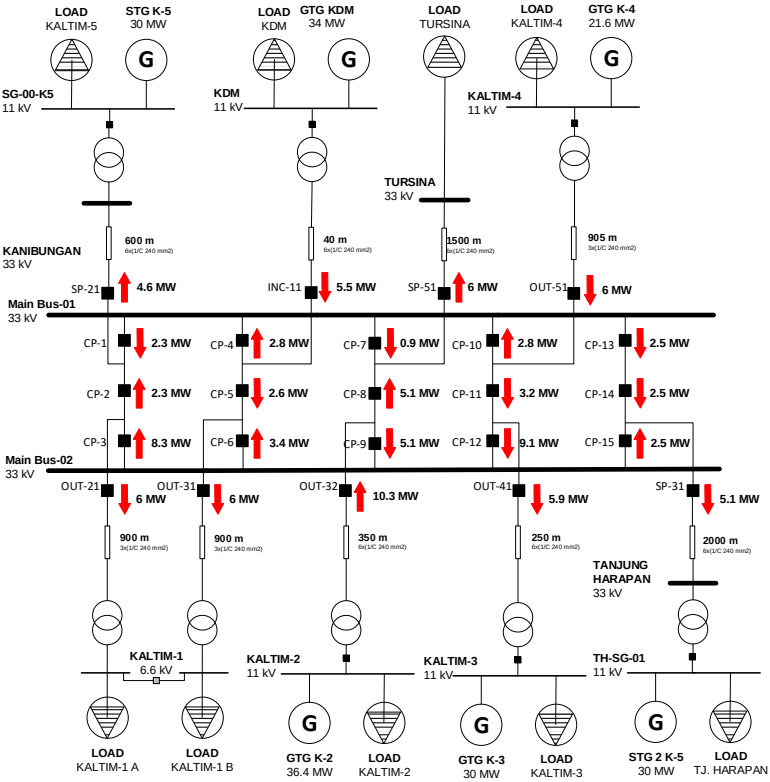
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Pada area interkoneksi nilai aliran daya menjadi lebih rendah jika dibandingkan nilai transfer daya dari *outgoing* masing-masing *island* dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.8 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Operasi Normal.

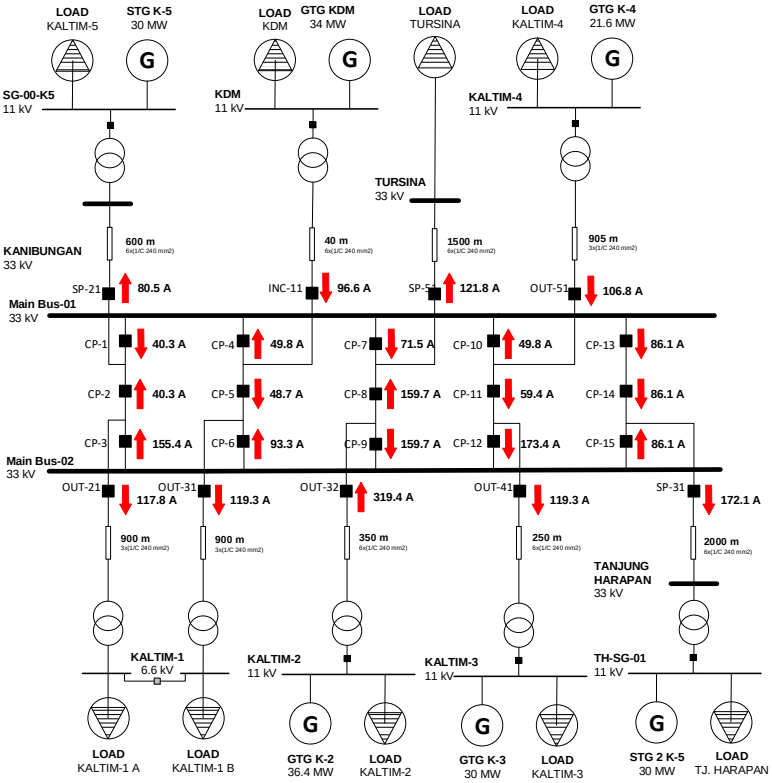
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-1	2,3	43,4
CP-5	3	60,2
CP-17	2,5	87,4
CP-7	3	60,9
CP-13	5,2	125,3
CP-3	2,7	61,4
CP-11	3	55,9
CP-15	2,9	65,1
CP-9	3	62,1
CP-2	2,3	43,4
CP-6	3	60,2
CP-18	2,5	87,4
CP-8	3	60,9
CP-14	5,2	125,3
CP-4	2,7	61,4
CP-12	3	55,9
CP-16	2,9	65,1
CP-10	3	62,1
SP-21	4,6	86,9
OUT-21	6	120,3
SP31	5	174,8
OUT31	6	121,7
OUT32	10,3	250,7
INC-11	5,3	122,8
OUT-51	6	111,8
OUT41	5,9	130,2
SP-51	6	124,2

4.1.1.3 *One and half breaker*

Gambar 4.5 dan 4.6 adalah hasil simulasi aliran daya 40ystem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *one and half breaker* dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.19 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Operasi Normal.



Gambar 4.20 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Operasi Normal.

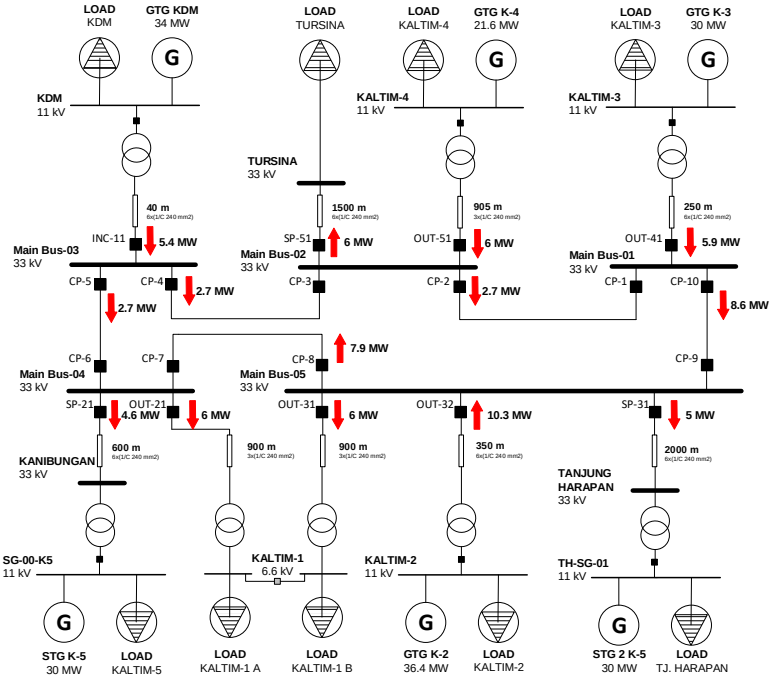
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Pada area interkoneksi nilai aliran daya menjadi lebih rendah jika dibandingkan nilai transfer daya dari *outgoing* masing-masing *island* dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.9 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Bus* Kondisi Operasi Normal.

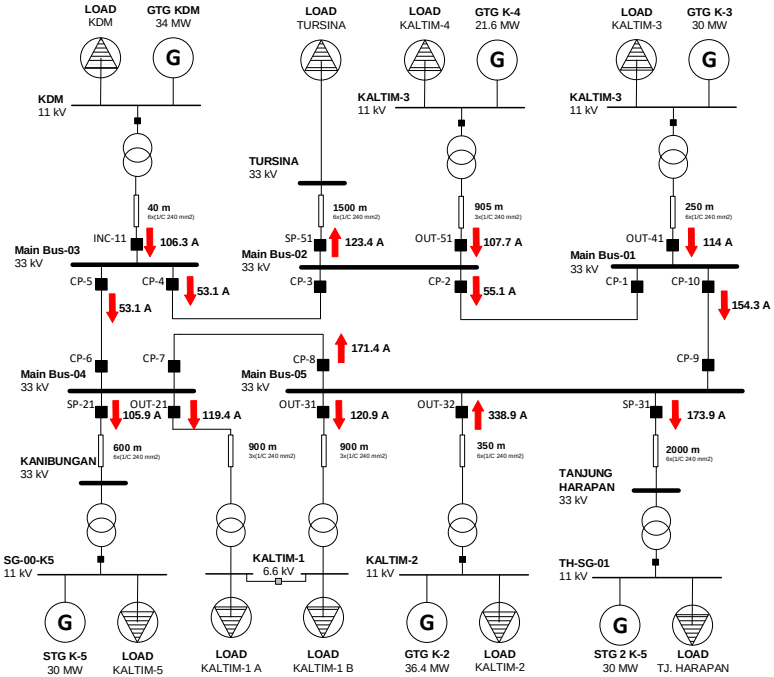
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-1	2,3	43,4
CP-2	2,3	43,4
CP-3	8,3	163,4
CP-13	2,5	87,4
CP-14	2,5	87,4
CP-15	2,5	87,4
CP-7	0,8	26,1
CP-8	5,2	125,3
CP-9	5,2	125,3
CP-4	2,8	60,5
CP-5	2,5	62,8
CP-6	3,5	63,9
CP-10	2,8	60,5
CP-11	3,2	57,6
CP-12	9,1	178,4
SP-21	4,6	86,9
OUT-21	6	120,3
SP31	5	174,8
OUT31	6	121,7
OUT32	10,3	250,7
INC-11	5,3	122,8
OUT-51	6	111,8
OUT41	5,9	130,2
SP-51	6	124,2

4.1.1.4 *Ring Bus*

Gambar 4.7 dan 4.8 adalah hasil simulasi aliran daya sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *ring bus* dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.21 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Operasi Normal.



Gambar 4.22 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Operasi Normal.

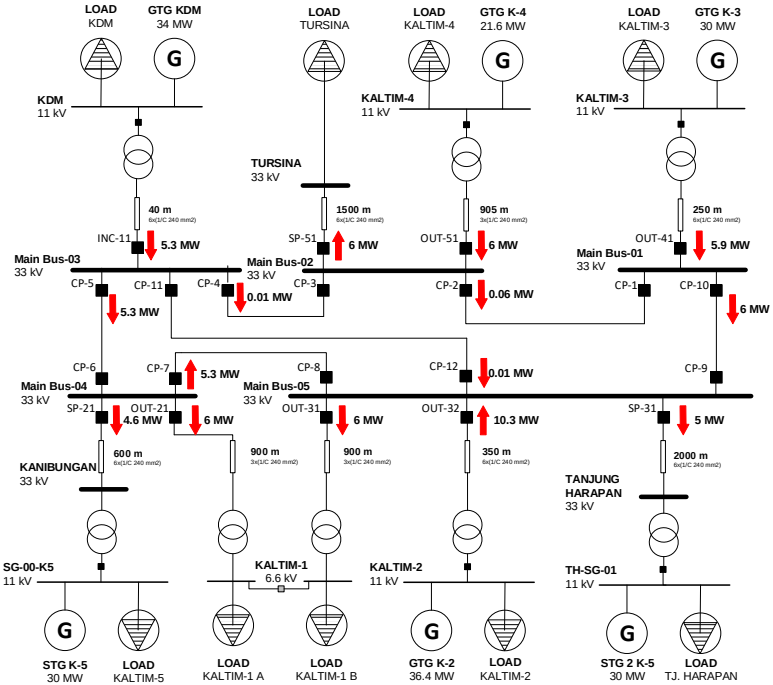
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Terdapat niali aliran daya yang bervariasi pada masing-masing saluran interkoneksi pada sinkron bus dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.10 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* Kondisi Operasi Normal.

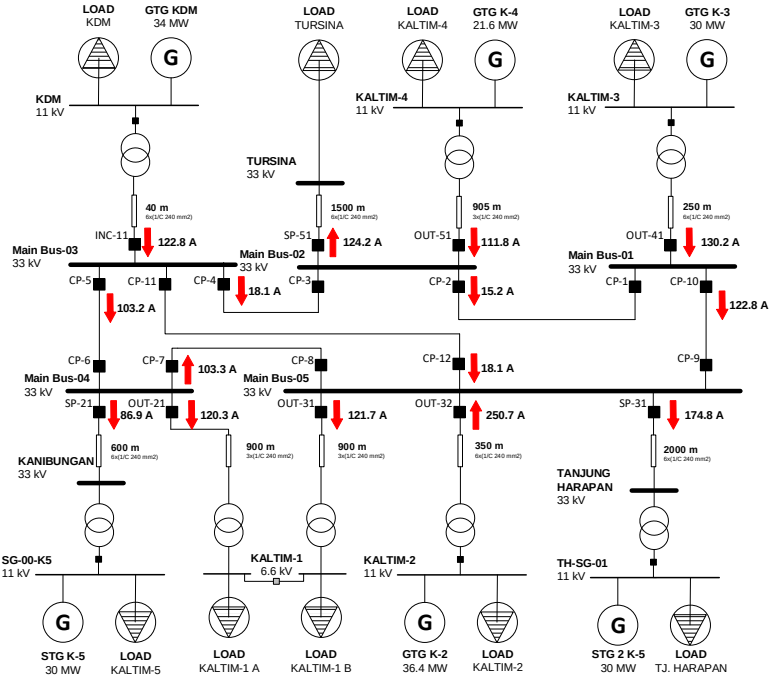
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-10	8,6	174,2
OUT-41	5,9	130,2
CP-1	2,7	48,6
CP-2	2,7	48,6
SP-51	6	124,2
OUT-51	6	111,8
CP-3	2,7	61,4
CP-4	2,7	61,4
INC-11	5,3	122,8
CP-5	2,7	61,4
CP-6	2,7	61,4
SP-21	4,6	86,9
OUT-21	6	120,3
CP-7	7,9	148,4
CP-8	7,9	148,4
SP-31	5	174,8
OUT-31	6	121,7
OUT-32	10,3	250,7
CP-9	8,6	174,2

4.1.1.5 *Mesh*

Gambar 4.9 dan 4.10 adalah hasil simulasi aliran daya 46ystem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *mesh* dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.23 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Operasi Normal.



Gambar 4.24 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Operasi Normal.

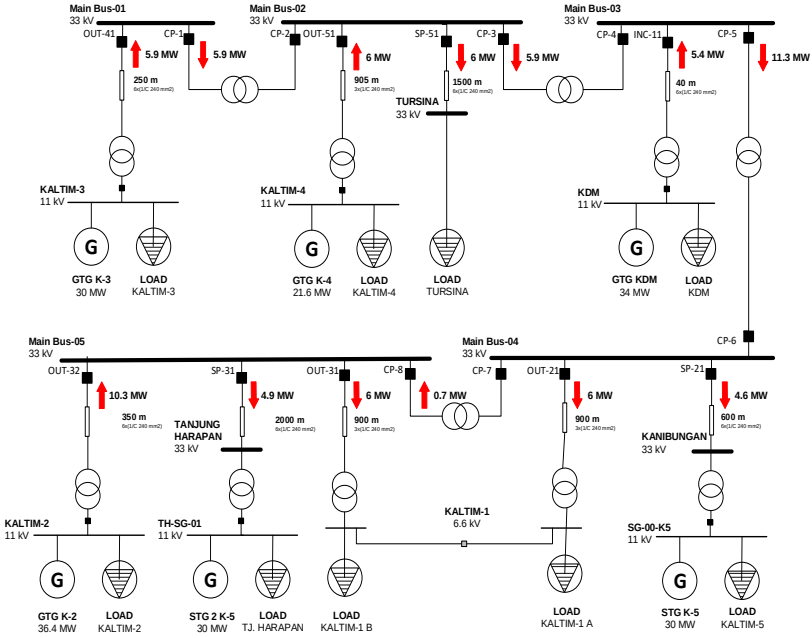
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Terdapat niali aliran daya yang bervariasi pada masing-masing saluran interkoneksi pada sinkron bus. Terdapat pula nilai aliran daya pada saluran interkoneksi yang jauh lebih rendah daripada metode integrasi sebelumnya dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.11 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Kondisi Operasi Normal.

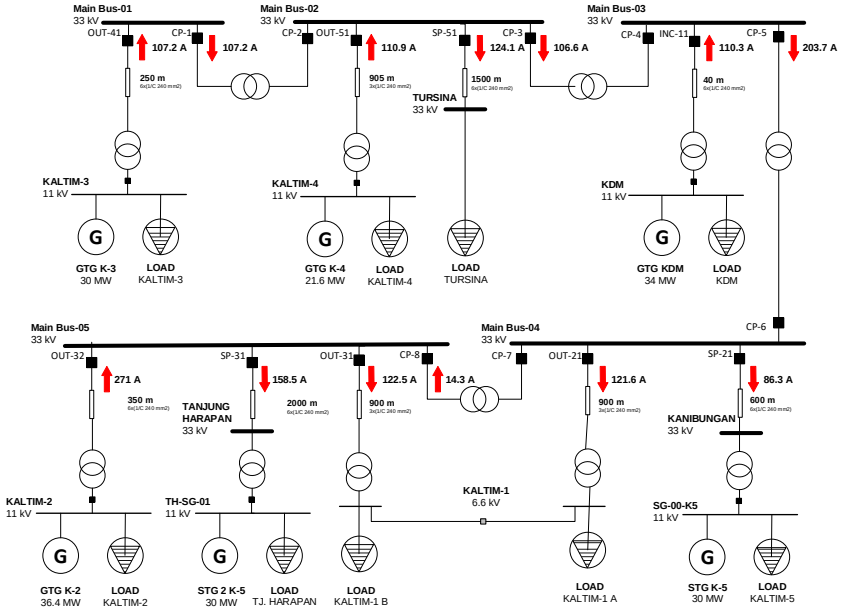
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-10	6	122,8
OUT-41	5,9	130,2
CP-1	0,06	15,2
CP-2	0,06	15,2
SP-51	6	124,2
OUT-51	6	111,8
CP-3	0,01	18,1
CP-4	0,01	18,1
INC-11	5,3	122,8
CP-11	0,01	18,1
CP-5	5,3	103,3
CP-6	5,3	103,3
SP-21	4,6	86,9
OUT-21	6	120,3
CP-7	5,3	103,3
CP-8	5,3	103,3
SP-31	5	174,8
OUT-31	6	121,7
OUT-32	10,3	250,7
CP-12	10,3	18,1
CP-9	6	122,8

4.1.1.6 *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi

Gambar 4.11 dan 4.12 adalah hasil simulasi aliran daya sitem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.25 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.



Gambar 4.26 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.

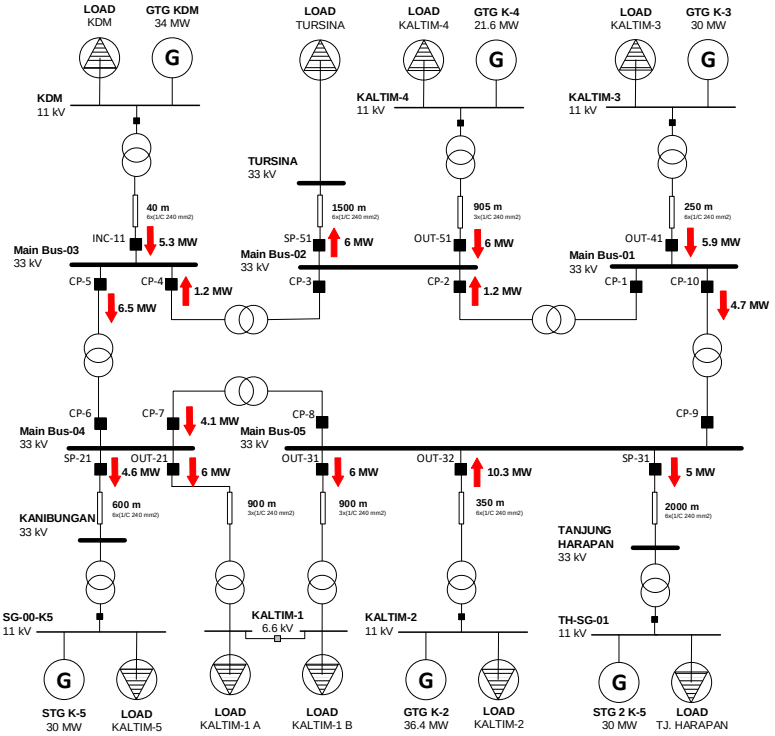
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Namun memiliki besar nilai arus dan aliran daya pada saluran interkoneksi yang berbeda dengan konfigurasi serupa tanpa penambahan trafo isolasi. Nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.12 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal.

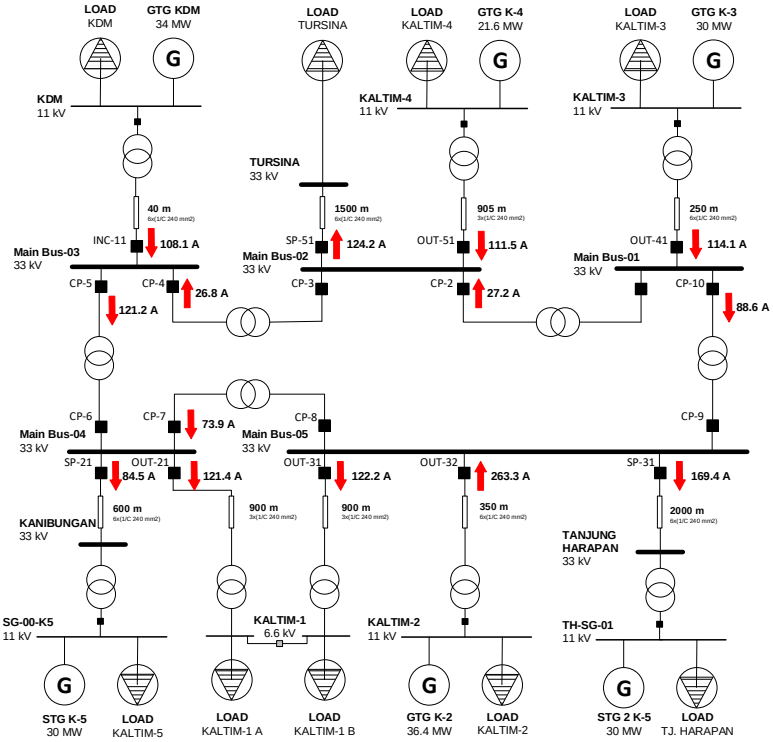
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
OUT-41	5,9	107,2
CP-1	5,9	107,2
CP-2	5,9	107,2
SP-51	6	124,1
OUT-51	6	110,9
CP-3	5,9	106,6
CP-4	5,9	106,6
INC-11	5,4	110,3
CP-5	11,3	203,7
CP-6	11,3	203,7
OUT-21	6	121,6
SP-21	4,6	86,3
CP-7	0,6	14,3
CP-8	0,6	14,3
SP-31	4,9	158,5
OUT-31	6	122,5
OUT-32	10,3	271

4.1.1.7 *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi

Gambar 4.13 dan 4.14 adalah hasil simulasi aliran daya sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *ring bus* dengan trafo isolasi dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.27 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.



Gambar 4.28 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.

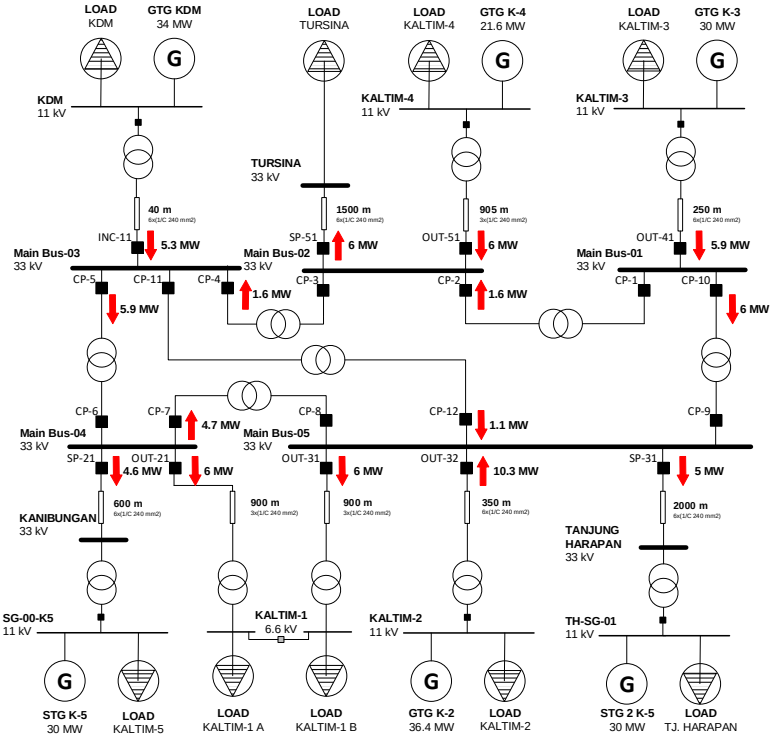
Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Namun pada metode ini memiliki besar nilai arus dan aliran daya pada saluran interkoneksi yang berbeda dengan konfigurasi serupa tanpa penambahan trafo isolasi dengan nilai besaran daya dan arus mengalir yang bervariasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.13 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal.

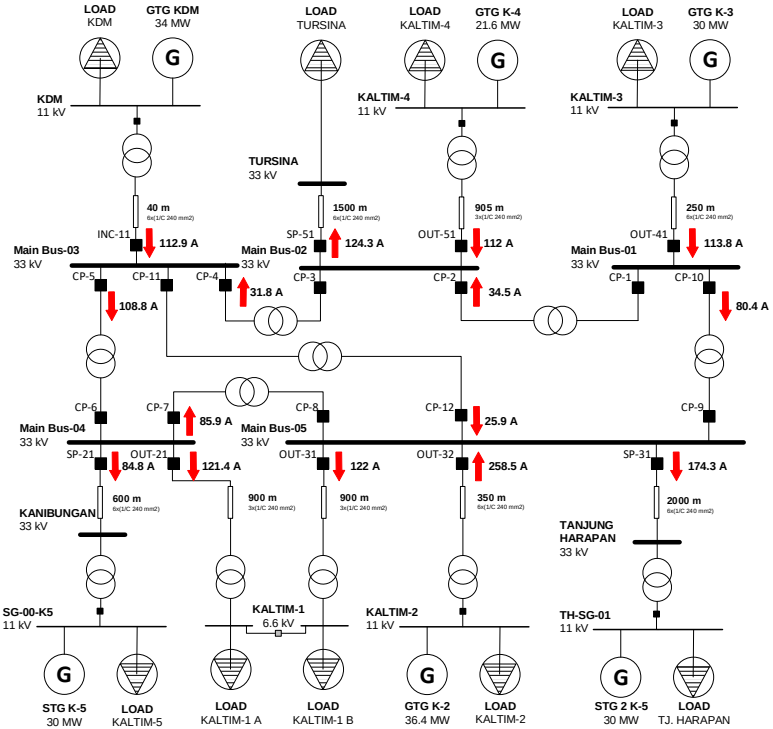
ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-10	4,7	88,6
OUT-41	5,9	144,1
CP-1	1,2	27,2
CP-2	1,2	27,2
SP-51	6	124,2
OUT-51	6	111,5
CP-3	1,2	26,8
CP-4	1,2	26,8
INC-11	5,3	108,1
CP-5	6,5	121,2
CP-6	6,5	121,2
SP-21	4,6	84,5
OUT-21	6	121,3
CP-7	4,1	73,9
CP-8	4,1	73,9
SP-31	4,9	169,4
OUT-31	6	122,2
OUT-32	10,3	262,3
CP-9	4,7	88,6

4.1.1.8 *Mesh* dengan Trafo Isolasi

Gambar 4.15 dan 4.16 adalah hasil simulasi aliran daya sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan konfigurasi *mesh* dengan trafo isolasi dalam keadaan operasi normal.



Gambar 4.29 Kondisi Aliran Daya Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.



Gambar 4.30 Kondisi Aliran Arus Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Operasi Normal.

Dari gambar diatas menunjukkan bahwa masing masing *island* mengalirkan daya dengan baik sesuai kebutuhan operasi dari tiap *island.* Namun konfigurasi ini memiliki besar nilai arus dan aliran daya pada saluran interkoneksi yang berbeda dengan konfigurasi serupa tanpa penambahan trafo isolasi dengan nilai besaran daya dan arus mengalir ditunjukkan pada tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.14 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Kondisi Operasi Normal.

ID	Transfer Daya (MW)	Arus Mengalir (A)
CP-10	4,3	80,4
OUT-41	5,9	113,8
CP-1	1,6	34,5
CP-2	1,6	34,5
SP-51	6	124,3
OUT-51	6	112
CP-3	1,6	31,8
CP-4	1,6	31,8
INC-11	5,3	112,9
CP-11	1,1	25,9
CP-5	5,9	108,8
CP-6	5,9	108,8
SP-21	4,6	84,8
OUT-21	6	121,4
CP-7	4,7	85,9
CP-8	4,7	85,9
SP-31	5	174,3
OUT-31	6	122
OUT-32	10,3	258,5
CP-12	1,1	25,9
CP-9	4,3	80,4

4.1.2 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Kondisi Operasi Normal

Tabel 4.15 Perbandingan Nilai Rugi-Rugi Daya Metode Integrasi *Power System Island* pada Kondisi Operasi Normal

Tipe	Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi Daya Reaktif (MVAR)
Sectionalized Single Bus	0,678	3,451
Double Breaker Doubel Bus	0,677	3,451
One Half Breaker	0,677	3,451
Ring Bus	0,677	3,451
Mesh	0,677	3,451
Sectionalized Single Bus dengan Trafo Isolasi	0,746	4,823
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	0,708	4,05
Mesh dengan Trafo Isolasi	0,707	4,02

Mengacu pada Tabel 4.9, diketahui bahwa pada kondisi tanpa penggunaan trafo isolasi, tidak terdapat perbedaan rugi-rugi daya yang signifikan dari masing-masing metode konfigurasi dimana total rugi daya aktif sebesar 0,678 MW. Akan tetapi, pada metode integrasi dengan penggunaan trafo isolasi, rugi daya aktif (MW-*losses*) pada keseluruhan sistem memiliki nilai lebih tinggi mencapai 0.746 MW pada *sectionalized* single *bus* dengan trafo isolasi.

4.1.3 Perbandingan Profil Tegangan Kondisi Operasi Normal

Tabel 4.16 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Kondisi Operasi Normal

Tipe	ID	*Rated* kV	Tegangan Bus	
			[kV]	[p.u.]
Sectionalized single Bus	Main Bus-01	33	32,374	0,981
	Main Bus-02	33	32,374	0,981
	Main Bus-03	33	32,374	0,981
	Main Bus-04	33	32,374	0,981
	Main Bus-05	33	32,374	0,981
Double Bus	Main Bus-01	33	32,374	0,981
	Main Bus-02	33	32,374	0,981

Tabel 4.17 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Kondisi Operasi Normal (lanjutan)

Tipe	ID	*Rated* kV	Tegangan Bus	
			[kV]	[p.u.]
One Half Breaker	Main Bus-01	33	32,374	0,981
	Main Bus-02	33	32,374	0,981
Ring Bus	Main Bus-01	33	32,374	0,981
	Main Bus-02	33	32,374	0,981
	Main Bus-03	33	32,374	0,981
	Main Bus-04	33	32,374	0,981
	Main Bus-05	33	32,374	0,981
Mesh	Main Bus-01	33	32,374	0,981
	Main Bus-02	33	32,374	0,981
	Main Bus-03	33	32,374	0,981
	Main Bus-04	33	32,374	0,981
	Main Bus-05	33	32,374	0,981
Sectionalized Single Bus dengan trafo isolasi	Main Bus-01	33	32,376	0,981
	Main Bus-02	33	32,414	0,982
	Main Bus-03	33	32,539	0,986
	Main Bus-04	33	32,058	0,971
	Main Bus-05	33	32,152	0,974
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	32,609	0,988
	Main Bus-02	33	32,386	0,981
	Main Bus-03	33	32,565	0,987
	Main Bus-04	33	32,1	0,973
	Main Bus-05	33	32,265	0,978
Mesh dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	32,615	0,988
	Main Bus-02	33	32,364	0,981
	Main Bus-03	33	32,499	0,985
	Main Bus-04	33	32,094	0,973
	Main Bus-05	33	32,287	0,978

Dari tabel 4.10 dan 4.11 menunjukkan data perbandingan profil tegangan dari masing-masing metode Integrasi. Pada konfigurasi tanpa pengunaan trafo isolasi dapat dianalisis bahwa nilai tegangan pada bus

sinkron utama 33kV beroperasi dengan besar nilai yang sama pada level 0,981 p.u. atau setara dengan 32,374 kV. Sedangkan pada konfigurasi dengan penambahan trafo isolasi terjadi nilai tegangan bus sinkron utama 33kV yang bervariasi degan nilai profil tegangan paling rendah pada level 0,971 p.u. atau setara dengan 32,058 kV pada main bus-04 *Sectionalized Single Bus*. Hal ini diakibatkan dari besar nilai impedansi dari penambahan trafo isolasi. Namun secara keseluruhan nilai tegangan pada tiap metode integrasi kondisi operasi normal masih memiliki nilai drop tegangan yang diijinkan diatas 0,95 p.u. atau setara dengan 31,35 kV.

4.2 Analisis Kontingensi

Untuk mengetahui keandalan dari masing-masing metode integrasi terhadap gangguan dan merencanakan kemampuan peralatan yang ada dalam sistem berkaitan dengan kemampuan penyaluran daya diperlukan analisis kontingensi baik dengan skema pelepasan salah satu unit pembangkitan maupun skema pelepasan saluran interkoneksi (N-1) dari masing-masing bus sinkron 33kV.

4.2.1 Skema Kontingensi

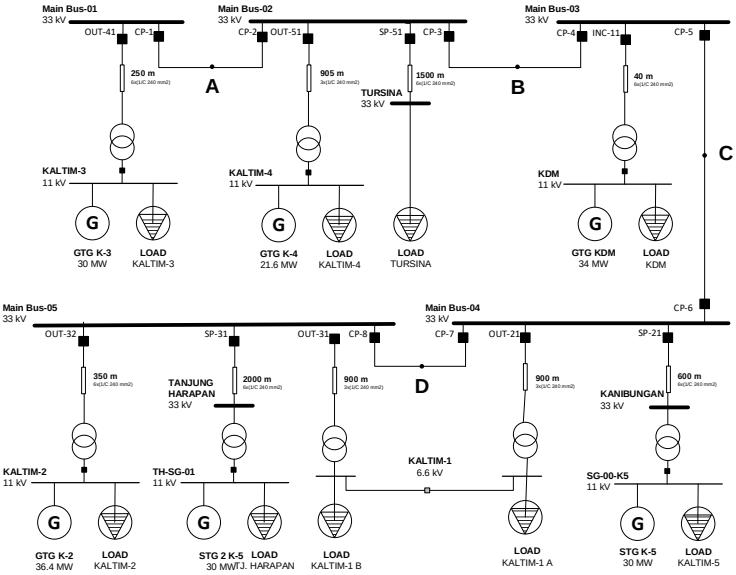
Dalam analisis kontingensi perlu dilakukan penentuan skema berupa pelepasan salah satu elemen unit pembangkit dan saluran interkoneksi (N-1) dari masing-msing metode integrasi yang akan mempengaruhi kinerja dan keandalan sistem tenaga listrik. Skema pelepasan generator aktif pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dirangkum pada tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.18 Skema Pelepasan Generator Aktif pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.

Kasus	Status Generator					
	K2 GE	**K3 Alsthom**	**K4 GENP**	**STG K5**	**STG2 K5**	**KDM Alsthom**
Kasus-1	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif
Kasus-2	-	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif
Kasus-3	Aktif	-	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif
Kasus-4	Aktif	Aktif	-	Aktif	Aktif	Aktif
Kasus-5	Aktif	Aktif	Aktif	-	Aktif	Aktif
Kasus-6	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	-	Aktif
Kasus-7	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	-

Penentuan skema pelepasan saluran interkoneksi (N-1) dari masing-masing metode integrasi dijelaskan sebagai berikut.

4.2.1.1 *Sectionalized Single Bus*



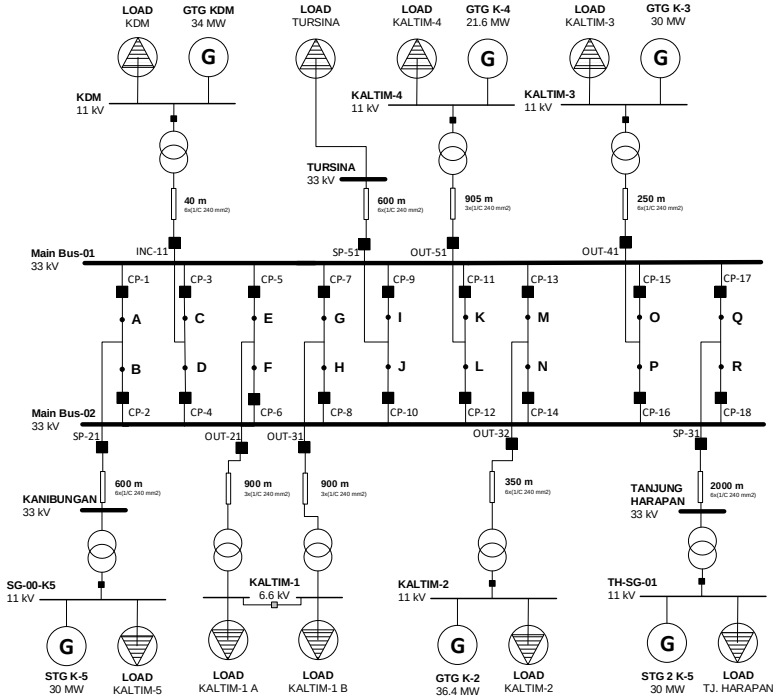
Gambar 4.31 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus*.

Dari gambar 4.17 dapat diketahui pada konfigurasi *sectionalized single bus* memiliki 4 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.19 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Sectionalized Single Bus*

Kasus	Status Saluran			
	A	B	C	D
Kasus-a	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1
Kasus-d	1	1	0	1
Kasus-e	1	1	1	0

4.2.1.2 *Double breaker Double bus*



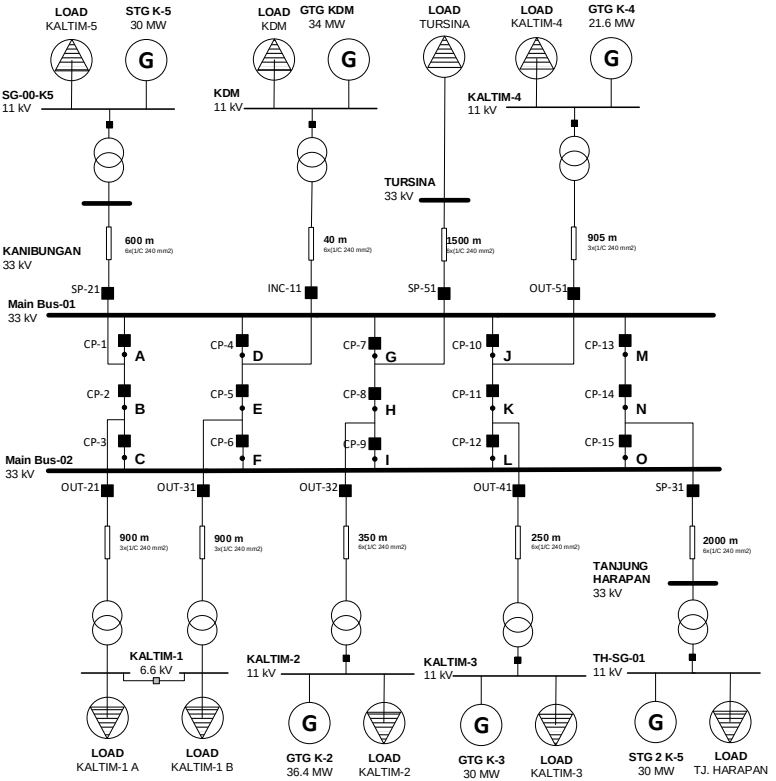
Gambar 4.32 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus*.

Dari gambar 4.18 dapat diketahui pada konfigurasi *double breaker double bus* memiliki 18 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.20 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Double Breaker Double Bus*

Kasus	Status Saluran																	
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**	**R**
Kasus-a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-d	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-e	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-f	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-g	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-h	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-i	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-j	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-l	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Kasus-n	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Kasus-o	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Kasus-p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Kasus-q	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Kasus-r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Kasus-s	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

4.2.1.3 *One and half breaker*



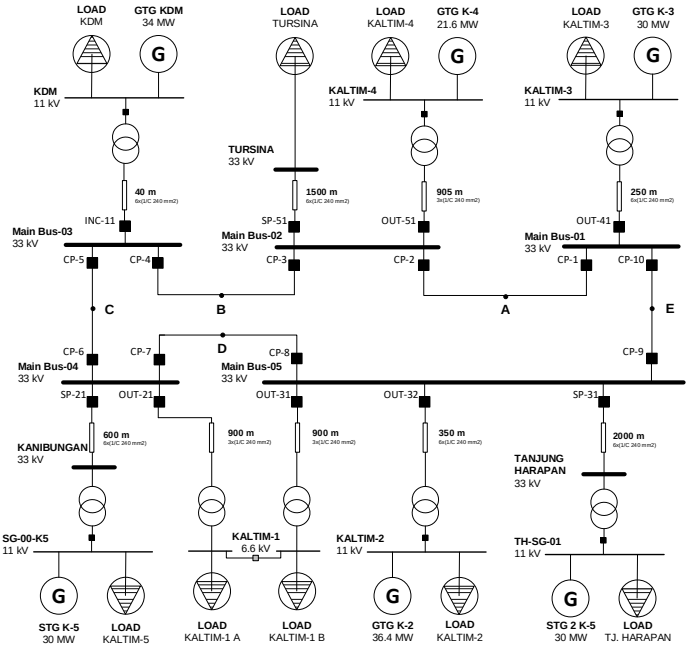
Gambar 4.33 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *One and Half Breaker*

Dari gambar 4.19 dapat diketahui pada konfigurasi *One and Half Breaker* memiliki 15 titik saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.21 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *One and Half Breaker*

Kasus	Status Saluran														
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**
Kasus-a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-d	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-e	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-f	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-g	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-h	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-i	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Kasus-j	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Kasus-g	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Kasus-h	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Kasus-i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Kasus-j	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Kasus-k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Kasus-l	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

4.2.1.4 *Ring Bus*



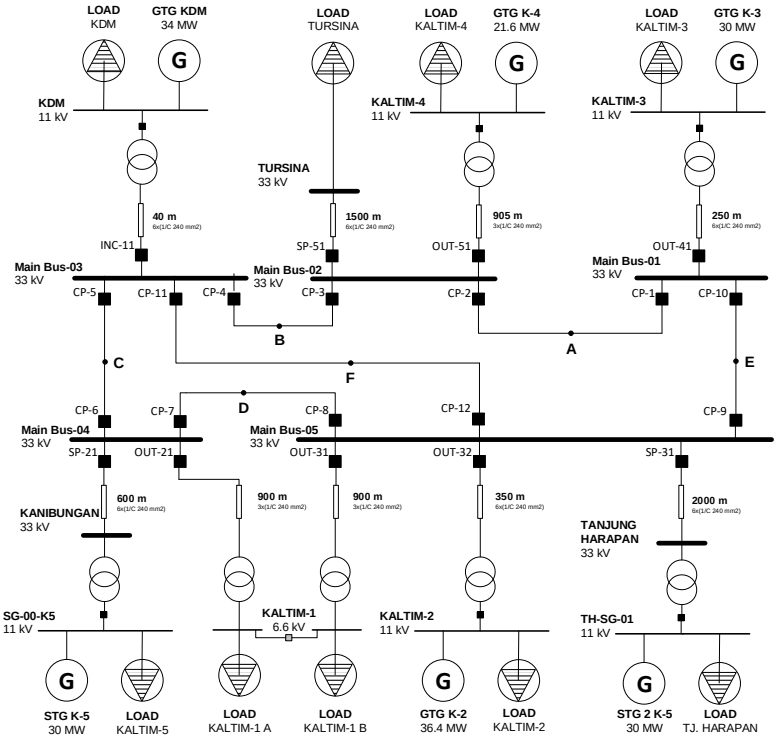
Gambar 4.34 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus.*

Dari gambar 4.20 dapat diketahui pada konfigurasi *ring bus* memiliki 5 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.22 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Ring Bus*

Kasus	Status Saluran				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
Kasus-a	1	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1	1
Kasus-d	1	1	0	1	1
Kasus-e	1	1	1	0	1
Kasus-f	1	1	1	1	0

4.2.1.5 *Mesh*



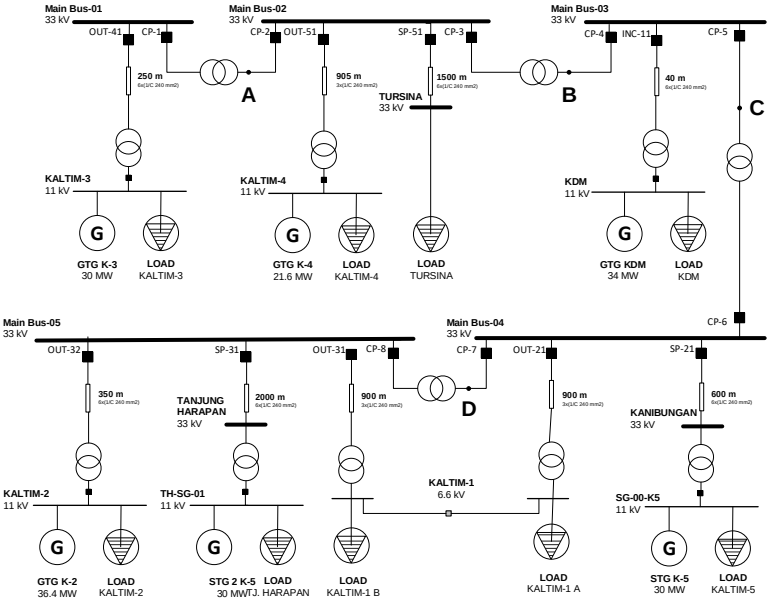
Gambar 4.35 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh.*

Dari gambar 4.21 dapat diketahui pada konfigurasi *mesh* memiliki 6 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.23 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Mesh*

Kasus	Status Saluran					
	A	B	C	D	E	F
Kasus-a	1	1	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1	1	1
Kasus-d	1	1	0	1	1	1
Kasus-e	1	1	1	0	1	1
Kasus-f	1	1	1	1	0	1
Kasus-g	1	1	1	1	1	0

4.2.1.6 *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi



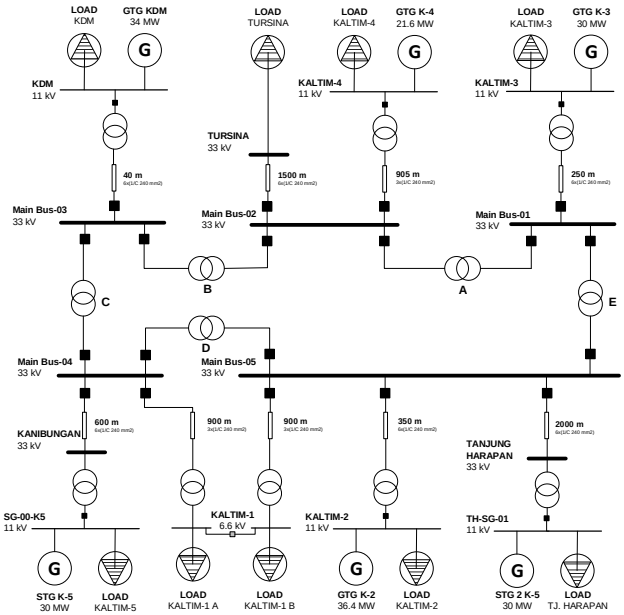
Gambar 4.36 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi.

Dari gambar 4.22 dapat diketahui pada konfigurasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi memiliki 4 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.24 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Sectionalized Bus* dengan Trafo Isolasi

Kasus	Status Saluran			
	A	**B**	**C**	**D**
Kasus-a	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1
Kasus-d	1	1	0	1
Kasus-e	1	1	1	0

4.2.1.7 *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi



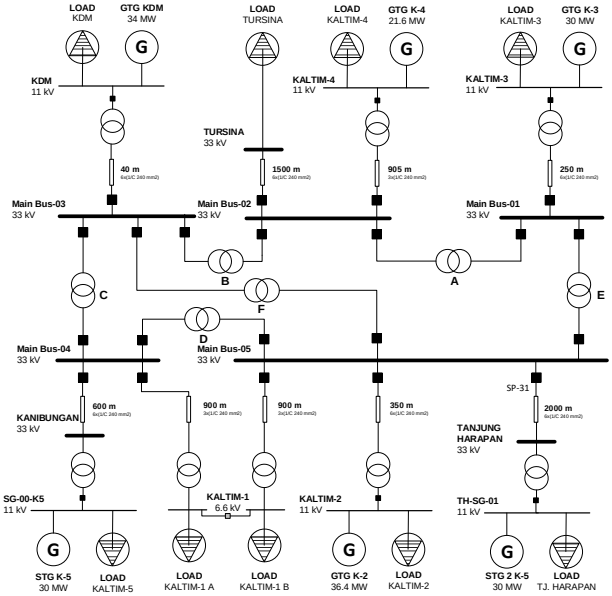
Gambar 4.37 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi.

Dari gambar 4.23 dapat diketahui pada konfigurasi *ring bus* memiliki 5 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.25 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi.

Kasus	Status Saluran				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
Kasus-a	1	1	1	1	1
Kasus-b	0	1	1	1	1
Kasus-c	1	0	1	1	1
Kasus-d	1	1	0	1	1
Kasus-e	1	1	1	0	1
Kasus-f	1	1	1	1	0

4.2.1.8 *Mesh* dengan Trafo Isolasi



Gambar 4.38 Titik Saluran Interkoneksi Bus Sinkron 33kV pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi.

Dari gambar 4.24 dapat diketahui pada konfigurasi *mesh* memiliki 6 saluran interkoneksi antar bus sinkron 33kV yang selanjutnya dibuat skema sebagai berikut.

Tabel 4.26 Skema Pelepasan Saluran Interkoneksi (N-1) *Mesh* dengan Trafo Isolasi.

Kasus	Status Saluran					
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Kasus-1	1	1	1	1	1	1
Kasus-2	0	1	1	1	1	1
Kasus-3	1	0	1	1	1	1
Kasus-4	1	1	0	1	1	1
Kasus-5	1	1	1	0	1	1
Kasus-6	1	1	1	1	0	1
Kasus-7	1	1	1	1	1	0

4.2.2 Transfer Daya Maksimum

Setelah dilakukan simulasi dengan memperimbangkan kondisi kontingensi (N-1) dari unit generator maupun saluran, didapatkan nilai transfer daya maksimum dan nilai arus maksimum pada masing-masing metode integrasi sebagai berikut.

4.2.2.1 *Sectionalized Single Bus*

Tabel 4.27 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
OUT-41	21,5	405,5
CP-1	21,5	405,6
CP-2	21,5	405,6
SP-51	16,1	136,2
OUT-51	8,9	381,9
CP-3	21,6	406,5
CP-4	21,6	406,5
INC-11	29,6	571,2

Tabel 4.28 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* Kondisi Kontingensi (lanjutan)

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-5	29,8	591,6
CP-6	29,8	591,6
OUT-21	14,6	337,2
SP-21	6	134,1
CP-7	21,5	462,3
CP-8	21,5	462,3
SP-31	14,2	512,2
OUT-31	6	134,5
OUT-32	32,4	655,1

Dari tabel 4.21 dan 4.22 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 134,1 A dan besar arus terbesar sebesar 655,1 A.

4.2.2.2 *Double breaker Double bus*

Tabel 4.29 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-1	14,6	326,3
CP-5	6	122,2
CP-17	13,2	277,9
CP-7	6	123,5
CP-13	26,6	287,7
CP-3	23,8	444
CP-11	8,8	190
CP-15	10,6	229,9
CP-9	6	125,9
CP-2	14,6	326,3
CP-6	6	122,2

Tabel 4.30 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Double Breaker Double Bus* Kondisi Kontingensi (lanjutan)

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-18	13,2	277,9
CP-8	6	123,5
CP-14	26,6	287,7
CP-4	23,8	444
CP-12	8,8	190
CP-16	10,6	229,9
CP-10	6	125,9
SP-21	14,6	326,3
OUT-21	6	122,2
SP31	13,2	277,9
OUT31	6	123,5
OUT32	26,6	287,7
INC-11	23,8	444
OUT-51	8,8	190
OUT41	10,6	229,9
SP-51	6	125,9

Dari tabel 4.23 dan 4.24 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 122,2 A dan besar arus terbesar sebesar 444 A.

4.2.2.3 *One and half breaker*

Tabel 4.31 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *one and half breaker* Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-1	20,6	446,8
CP-2	14,6	326,3
CP-3	20,6	446,8
CP-13	13,2	277,9

Tabel 4.32 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *one and half breaker* Kondisi Kontingensi (lanjutan)

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-14	13,2	277,9
CP-15	13,2	277,9
CP-7	20,1	386
CP-8	26,4	508,7
CP-9	20,4	386
CP-4	17,8	340,6
CP-5	23,8	444
CP-6	17,5	352,8
CP-10	11,9	296,3
CP-11	11,6	238,4
CP-12	13,2	296,3
SP-21	14,6	326,3
OUT-21	6	122,2
SP31	13,2	277,9
OUT31	6	123,5
OUT32	26,6	287,7
INC-11	23,8	444
OUT-51	8,8	190
OUT41	10,6	229,9
SP-51	6	125,9

Dari tabel 4.25 dan 4.26 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 122,2 A dan besar arus terbesar sebesar 508,7 A.

4.2.2.4 *Ring Bus*

Tabel 4.33 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *ring bus* Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-10	29,8	591,6
OUT-41	10,6	229,9
CP-1	23,9	444,6
CP-2	23,9	444,6
SP-51	6	125,9
OUT-51	8,8	190
CP-3	23,8	444
CP-4	23,8	444
INC-11	23,8	444
CP-5	29,8	591,6
CP-6	29,8	591,6
SP-21	14,6	326,3
OUT-21	6	122,2
CP-7	21,4	446,8
CP-8	21,4	446,8
SP-31	13,2	277,9
OUT-31	6	123,5
OUT-32	26,6	508,7
CP-9	29,8	591,6

Dari tabel 4.27 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 122,2 A dan besar arus terbesar sebesar 591,6 A.

4.2.2.5 *Mesh*

Tabel 4.34 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-10	17,8	375,6
OUT-41	10,6	229,9
CP-1	14,8	315
CP-2	14,8	315
SP-51	6	125,9
OUT-51	8,8	190
CP-3	14,8	315
CP-4	14,8	315
INC-11	23,8	444
CP-11	14,9	295,8
CP-5	20,6	446,8
CP-6	20,6	446,8
SP-21	14,6	326,3
OUT-21	6	122,2
CP-7	20,6	446,8
CP-8	20,6	446,8
SP-31	13,2	277,9
OUT-31	6	123,5
OUT-32	26,6	508,7
CP-12	26,6	295,8
CP-9	17,8	375,6

Dari tabel 4.28 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 122,2 A dan besar arus terbesar sebesar 508,7 A.

4.2.2.6 *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi

Tabel 4.35 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
OUT-41	21	504,2
CP-1	20,9	504,2
CP-2	20,9	504,2
SP-51	6	144,7
OUT-51	15,9	401,6
CP-3	20,6	535,4
CP-4	20,6	535,4
INC-11	28,9	970
CP-5	28,5	981
CP-6	28,5	981
OUT-21	6	200,1
SP-21	14,6	530
CP-7	21,5	659,6
CP-8	21,5	659,6
SP-31	14,2	310
OUT-31	6	244
OUT-32	32,3	767,1

Dari tabel 4.29 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 144,7 A dan besar arus terbesar sebesar 981 A.

4.2.2.7 *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi

Tabel 4.36 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Ring Bus* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-10	23,8	725,7
OUT-41	10,4	309,3
CP-1	21,7	506,5
CP-2	21,7	506,5
SP-51	6	141,5
OUT-51	8,8	213,9
CP-3	21,9	496,1
CP-4	21,9	496,1
INC-11	23,8	622,1
CP-5	28,5	795,1
CP-6	28,5	795,1
SP-21	14,5	404
OUT-21	6	168,2
CP-7	21,5	564,2
CP-8	21,5	564,2
SP-31	13,1	281,2
OUT-31	6	196,5
OUT-32	26,7	545,7
CP-9	23,8	725,7

Dari tabel 4.30 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 141,5 A dan besar arus terbesar sebesar 795,1 A.

4.2.2.8 *Mesh* dengan Trafo Isolasi

Tabel 4.37 Nilai Transfer daya dan Arus Mengalir Maksimum Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan Konfigurasi *Mesh* dengan Trafo Isolasi Kondisi Kontingensi.

ID	Transfer Daya Maksimum (MW)	Arus Mengalir Maksimum (A)
CP-10	12,2	246,9
OUT-41	10,4	249,2
CP-1	14,8	348,9
CP-2	14,8	348,9
SP-51	6	137,3
OUT-51	8,8	211,7
CP-3	14,8	348,9
CP-4	14,8	348,9
INC-11	23,8	462,1
CP-11	19,2	362,1
CP-5	20,5	537,4
CP-6	20,5	537,4
SP-21	14,5	390,9
OUT-21	6	147,9
CP-7	20,5	532
CP-8	20,5	532
SP-31	13,2	279,5
OUT-31	6	130,5
OUT-32	26,7	1257,8
CP-12	19,2	362,1
CP-9	12,2	246,9

Dari tabel 4.31 dapat diketahui bahwa nilai transfer daya maksimum dan nilai arus mengalir memiliki nilai lebih tinggi daripada kondisi operasi normal. Nilai arus maksimum yang mengalir memiliki besar arus terkecil sebesar 130,5 A dan besar arus terbesar sebesar 1257,8 A.

4.2.3 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Setelah Dilakukan Kontingensi

Tabel 4.38 Perbandingan Nilai Rugi-Rugi Daya Terbesar Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi.

Tipe	Rugi Daya Aktif	Rugi Daya Reaktif
	(MW)	(MVAR)
Sectionalized Bus	1,391	10,89
One and Half Breaker	0,845	6,91
Double Bus	0,845	6,91
Ring Bus	0,841	6,849
Mesh	0,841	6,849
Sectionalized Bus dengan Trafo Isolasi	2,285	51,163
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	2,285	33,882
Mesh dengan Trafo Isolasi	1,307	15,298

Dari tabel 4.32 diatas, didapatkan nilai rugi-rugi daya yang terbesar yang mungkin terjadi pada sistem kelistrikan PT. Kalimantan Timur dengan analisis kontingensi (N-1) pada unit pembangkit dan saluran interkoneksi. Berdasarkan besar rugi-rugi daya aktif metode integrasi *sectionalized single bus* dengan trafo isolasi dan *ring bus* dengan trafo isolasi memiliki nilai yang sama dan dan memilikiki rugi-rugi daya aktif paling tinggi jika dibandingkan metode integrasi yang lain. Hal ini mengingat impedansi pada trafo isolasi yang lebih tinggi dibandingkan hanya dengan interkoneksi menggunakan kabel.

4.2.4 Perbandingan Profil Tegangan Setelah Dilakukan Kontingensi

Tabel 4.39 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Terendah Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi

Tipe	ID	*Rated* kV	Tegangan Bus	
			kV	p.u.
Sectionalized single Bus	Main Bus-01	33	29,22	0,89
	Main Bus-02	33	29,13	0,88
	Main Bus-03	33	31,31	0,95
	Main Bus-04	33	29,20	0,89
	Main Bus-05	33	29,20	0,89

Tabel 4.40 Perbandingan Profil Tegangan Bus Sinkron Utama 33kV Terendah Tiap Metode Integrasi *Island* Kelistrikan Setelah Dilakukan Kontingensi (lanjutan)

Tipe	**ID**	***Rated*** **kV**	**Tegangan Bus**	
			kV	**p.u.**
Double Bus	Main Bus-01	33	31,90	0,97
	Main Bus-02	33	31,90	0,97
One Half Breaker	Main Bus-01	33	31,90	0,97
	Main Bus-02	33	31,90	0,97
Ring Bus	Main Bus-01	33	31,90	0,97
	Main Bus-02	33	31,90	0,97
	Main Bus-03	33	31,90	0,97
	Main Bus-04	33	31,90	0,97
	Main Bus-05	33	31,90	0,97
Mesh	Main Bus-01	33	31,90	0,97
	Main Bus-02	33	31,90	0,97
	Main Bus-03	33	31,90	0,97
	Main Bus-04	33	31,90	0,97
	Main Bus-05	33	31,90	0,97
Sectionalized dengan trafo isolasi	Main Bus-01	33	26,71	0,81
	Main Bus-02	33	26,10	0,82
	Main Bus-03	33	26,37	0,72
	Main Bus-04	33	23,01	0,7
	Main Bus-05	33	21,39	0,66
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	24,27	0,74
	Main Bus-02	33	27,35	0,83
	Main Bus-03	33	25,14	0,76
	Main Bus-04	33	19,31	0,59
	Main Bus-05	33	19,31	0,59
Mesh dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	28,73	0,87
	Main Bus-02	33	28,98	0,88
	Main Bus-03	33	30,57	0,93
	Main Bus-04	33	26,68	0,81
	Main Bus-05	33	30,12	0,91

Dari tabel 4.33 dan 4.34 menunjukkan data perbandingan profil tegangan terendah yang dapat terjadi pada sistem dari dari masing-masing metode integrasi setalah dilakukan analisis kontingensi (N-1). Pada konfigurasi *double bus*, *one half breaker, ring bus,* dan *mesh* beroperasi dengan besar nilai yang sama pada level 0,967 p.u. atau setara dengan 31,897 kV. Sedangkan pada konfigurasi dengan penambahan trafo isolasi terjadi nilai tegangan bus sinkron utama 33kV yang bervariasi degan nilai profil tegangan paling rendah pada level 0,585 p.u. atau setara dengan 19,398 kV pada main bus-04 *Ring Bus*.

4.3 Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat bertujuan untuk mengetahui kapasitas hubung singkat pada peralatan saat terjadi hubung singkat akibat gangguan kelistrikan. Sehingga dapat ditentukan ketahanan peralatan (*circuit breaker* dan busbar) yang sesuai pada masing-masing metode integrasi sistem kelistrikan.

Pada simulasi dan analisis hubung singkat ini, digunakan kondisi arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi dengan pola operasi normal enam generator aktif. Metode yang dilakukan menggunakan standar IEC (International Electrotechnical Commission) dimana hubung singkat yang terjadi adalah hubung singkat tiga fasa simetri tanpa impedansi dengan *prefault voltage* sebesar 1.05 pu. Pada standar IEC terdapat beberapa domain waktu yang digunakan dengan mengklasifikasikan besaran arus pada saat terjadinya *peak short circuit current, asymmetric short circuit current,* dan *symmetric short circuit current.*

Beberapa notasi dan istilah yang akan digunakan pada analisis hubung singkat diantaranya:

- Ip : Merupakan nilai puncak arus hubung singkat
- Ib : Merupakan nilai arus hubung singkat (*Symmetrical short breaking circuit current*) atau nilai rms komponen AC simetris arus hubung singkat saat pemisahan kontak atau saat terjadi pemutusan dari peralatan pemutus (*circuit breaker*)

4.3.1. Analisis Hubung Singkat untuk Busbar

Pada simulasi dan analisis hubung singkat ini, busbar yang dianalisis sebatas pada bus sinkron utama 33kV. Perbandingan hasil simulasi hubung singkat untuk busbar pada masing-masing metode integrasi dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4.41 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat pada bus sinkron utama di Tegangan 33kV Masing-Masing Metode Integrasi

Konfigurasi	**ID**	**Tegangan (kV)**	**Arus Hubung Singkat (kA)**
			Ip
Sectionalized single Bus	Main Bus-01	33	50,99
	Main Bus-02	33	51,15
	Main Bus-03	33	51,24
	Main Bus-04	33	51,27
	Main Bus-05	33	51,21
Double Bus	Main Bus-01	33	51,37
	Main Bus-02	33	51,34
One Half Breaker	Main Bus-01	33	51,30
	Main Bus-02	33	51,32
Ring Bus	Main Bus-01	33	51,27
	Main Bus-02	33	51,25
	Main Bus-03	33	51,25
	Main Bus-04	33	51,28
	Main Bus-05	33	51,31
Mesh	Main Bus-01	33	51,27
	Main Bus-02	33	51,26
	Main Bus-03	33	51,31
	Main Bus-04	33	51,28
	Main Bus-05	33	51,33
Sectionalized dengan trafo isolasi	Main Bus-01	33	12,40
	Main Bus-02	33	16,20
	Main Bus-03	33	17,58
	Main Bus-04	33	20,47
	Main Bus-05	33	23,61

Tabel 4.42 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat pada bus sinkron utama di Tegangan 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan)

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)
			Ip
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	18,12
	Main Bus-02	33	17,14
	Main Bus-03	33	17,63
	Main Bus-04	33	20,66
	Main Bus-05	33	28,15
Mesh dengan Trafo Isolasi	Main Bus-01	33	18,15
	Main Bus-02	33	17,49
	Main Bus-03	33	22,43
	Main Bus-04	33	20,75
	Main Bus-05	33	31,75

Berdasarkan tabel 4.35 dan 4.36 dapat dianalisis bahwa penambahan trafo isolasi dapat mereduksi nilai arus hubung singkat secara signifikan pada bus sinkron utama 33kV dari masing-masing metode integrasi. Pada metode integrasi tanpa penambahan trafo isolasi memiliki besar arus hubung singkat dengan besar terendah sebesar 50,99 kA dan terbesar sebesar 51,37 kA. Sedangkan pada metode integrasi dengan penambahan trafo isolasi, nilai arus hubung singkat terendah sebesar 12,4 kA dan tertinggi sebesar 31,75 kA.

4.3.2 Analisis Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB)

Simulasi dilakukan dengan memodelkan hubung singkat pada bus sinkron 33kV yang terhubung pada masing-masing *circuit breaker*. Sehingga didapatkan arus kontribusi terbesar yang mengalir melalui *circuit breaker* yang dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4.43 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			Ip	Ib sym	Ib asym
Sectionalized Single Bus	SP-21	33	20,14	51,28	18,64
	OUT-21	33	20,14	51,28	18,64
	CP-7	33	20,14	51,28	18,64
	CP-8	33	20,13	51,22	18,63
	CP-4	33	20,14	51,26	18,64
	INC-11	33	20,14	51,26	18,64
	CP-5	33	20,14	51,26	18,85
	CP-6	33	20,14	51,28	18,64
	OUT-51	33	20,12	51,17	18,63
	SP-51	33	20,12	51,17	18,63
	CP-3	33	20,12	51,17	18,63
	OUT-41	33	20,08	51,03	18,60
	CP-1	33	20,08	51,03	18,60
	CP-2	33	20,12	51,17	18,63
	OUT-31	33	20,13	51,22	18,63
	OUT-32	33	20,13	51,22	18,63
	SP-31	33	20,13	51,22	18,63
Double Breaker Double Bus	SP-21	33	51,34	18,77	21,13
	OUT-21	33	51,34	18,77	21,13
	INC-11	33	51,34	18,77	21,13
	OUT-51	33	51,34	18,77	21,13
	SP-51	33	51,34	18,77	21,13
	SP-31	33	51,34	18,77	21,13
	OUT-31	33	51,34	18,77	21,13
	OUT-32	33	51,34	18,77	21,13
	OUT-41	33	51,34	18,77	21,13
	CP-1	33	51,37	18,66	20,54
	CP-2	33	51,37	18,66	20,54
	CP-6	33	51,37	18,66	20,54
	CP-5	33	51,37	18,66	20,54
	CP-17	33	51,37	18,66	20,54
	CP-18	33	51,37	18,66	20,54
	CP-7	33	51,37	18,66	20,54
	CP-8	33	51,37	18,66	20,54
	CP-13	33	51,37	18,66	20,54

Tabel 4.44 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan)

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			Ip	Ib sym	Ib asym
Double Breaker Double Bus	CP-14	33	51,37	18,66	20,54
	CP-3	33	51,37	18,66	20,54
	CP-4	33	51,37	18,66	20,54
	CP-11	33	51,37	18,66	20,54
	CP-12	33	51,37	18,66	20,54
	CP-15	33	51,37	18,66	20,54
	CP-16	33	51,37	18,66	20,54
	CP-9	33	51,37	18,66	20,54
	CP-10	33	51,37	18,66	20,54
One Half Breaker	SP-21	33	51,32	18,65	20,32
	OUT-21	33	51,32	18,65	20,32
	INC-11	33	51,32	18,65	20,32
	OUT-51	33	51,32	18,65	20,32
	SP-51	33	51,32	18,65	20,32
	SP-31	33	51,32	18,65	20,32
	OUT-31	33	51,32	18,65	20,32
	OUT-32	33	51,32	18,65	20,32
	OUT-41	33	51,32	18,65	20,32
	CP-1	33	51,30	18,65	20,31
	CP-2	33	51,32	18,65	20,32
	CP-3	33	51,32	18,65	20,32
	CP-13	33	51,30	18,65	20,31
	CP-14	33	51,32	18,65	20,32
	CP-15	33	51,32	18,65	20,32
	CP-7	33	51,30	18,65	20,31
	CP-8	33	51,32	18,65	20,32
	CP-9	33	51,32	18,65	20,32
	CP-4	33	51,30	18,65	20,31
	CP-5	33	51,32	18,65	20,32
	CP-6	33	51,32	18,65	20,32
	CP-10	33	51,30	18,65	20,31
	CP-11	33	51,32	18,65	20,32
	CP-12	33	51,32	18,65	20,32

Tabel 4.45 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan)

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			Ip	Ib sym	Ib asym
Ring Bus	CP-6	33	51,29	18,76	21,09
	SP-21	33	51,29	18,76	21,09
	OUT-21	33	51,29	18,76	21,09
	CP-7	33	51,29	18,76	21,09
	CP-5	33	51,27	18,85	21,88
	INC-11	33	51,27	18,76	21,08
	CP-4	33	51,27	18,76	21,08
	CP-3	33	51,26	18,76	21,07
	OUT-51	33	51,26	18,76	21,07
	SP-51	33	51,26	18,76	21,07
	CP-2	33	51,26	18,76	21,07
	CP-10	33	51,28	18,76	21,09
	OUT-41	33	51,28	18,76	21,09
	CP-1	33	51,28	18,76	21,09
	SP-31	33	51,32	18,77	21,11
	OUT-31	33	51,32	18,77	21,11
	CP-8	33	51,32	18,77	21,11
	OUT-32	33	51,32	18,77	21,11
	CP-9	33	51,32	18,77	21,11
Mesh	SP-21	33	51,28	18,76	21,08
	OUT-21	33	51,28	18,76	21,08
	CP-7	33	51,28	18,76	21,08
	CP-6	33	51,28	18,76	21,08
	CP-5	33	51,28	18,76	21,08
	INC-11	33	51,31	18,77	21,10
	CP-4	33	51,31	18,77	21,10
	CP-3	33	51,31	18,77	21,10
	OUT-51	33	51,26	18,76	21,06
	SP-51	33	51,26	18,76	21,06
	CP-2	33	51,26	18,76	21,06
	CP-1	33	51,27	18,76	21,08
	OUT-41	33	51,27	18,76	21,08
	CP-10	33	51,27	18,76	21,08
	SP-31	33	51,33	18,71	21,12
	OUT-31	33	51,33	18,71	21,12

Tabel 4.46 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan)

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			Ip	Ib sym	Ib asym
Mesh	CP-9	33	51,33	18,71	21,12
	OUT-32	33	51,33	18,71	21,12
	CP-8	33	51,33	18,71	21,12
	CP-11	33	51,31	18,77	21,10
	CP-12	33	51,33	18,71	21,12
Sectionalized dengan trafo isolasi	SP-21	33	20,47	7,60	8,38
	OUT-21	33	20,47	7,60	8,38
	CP-7	33	20,47	7,60	8,38
	CP-8	33	23,61	8,53	9,23
	CP-4	33	17,58	6,69	7,41
	INC-11	33	17,58	6,69	7,41
	CP-5	33	17,58	6,69	7,41
	CP-6	33	20,47	7,60	8,38
	OUT-51	33	16,20	6,10	6,43
	SP-51	33	16,20	6,10	6,43
	CP-3	33	16,20	6,10	6,43
	OUT-41	33	12,40	4,64	5,22
	CP-1	33	12,40	4,64	5,22
	CP-2	33	16,20	6,10	6,43
	OUT-31	33	23,61	8,53	9,23
	OUT-32	33	23,61	8,53	9,23
	SP-31	33	23,61	8,53	9,23
Ring Bus dengan trafo isolasi	CP-6	33	20,66	7,70	8,78
	SP-21	33	20,66	7,70	8,78
	OUT-21	33	20,66	7,70	8,78
	CP-7	33	20,66	7,70	8,78
	CP-5	33	17,63	6,68	7,66
	INC-11	33	17,63	6,68	7,66
	CP-4	33	17,63	6,68	7,66
	CP-3	33	17,14	6,51	7,11
	OUT-51	33	17,14	6,51	7,11
	SP-51	33	17,14	6,51	7,11
	CP-2	33	17,14	6,51	7,11
	CP-10	33	18,12	6,84	7,87
	OUT-41	33	18,12	6,84	7,87
	CP-1	33	18,12	6,84	7,87

Tabel 4.47 Perbandingan Hasil Simulasi Hubung Singkat untuk *Circuit Breaker* (CB) yang terhubung dengan Bus Sinkron 33kV Masing-Masing Metode Integrasi (lanjutan)

Konfigurasi	ID	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			Ip	Ib sym	Ib asym
Ring Bus dengan trafo isolasi	SP-31	33	28,15	10,33	11,59
	OUT-31	33	28,15	10,33	11,59
	CP-8	33	28,15	10,33	11,59
	OUT-32	33	28,15	10,33	11,59
	CP-9	33	28,15	10,33	11,59
Mesh dengan trafo isolasi	CP-6	33	20,75	7,74	8,81
	SP-21	33	20,75	7,74	8,81
	OUT-21	33	20,75	7,74	8,81
	CP-7	33	20,75	7,74	8,81
	CP-5	33	22,43	8,52	9,73
	CP-11	33	22,43	8,52	9,73
	INC-11	33	22,43	8,52	9,73
	CP-4	33	22,43	8,52	9,73
	CP-3	33	17,49	6,64	7,25
	OUT-51	33	17,49	6,64	7,25
	CP-2	33	17,49	6,64	7,25
	SP-51	33	17,49	6,64	7,25
	CP-10	33	18,15	6,85	7,88
	OUT-41	33	18,15	6,85	7,88
	CP-1	33	18,15	6,85	7,88
	SP-31	33	31,75	11,72	13,17
	OUT-31	33	31,75	11,72	13,17
	CP-8	33	31,75	11,72	13,17
	OUT-32	33	31,75	11,72	13,17
	CP-12	33	31,75	11,72	13,17
	CP-9	33	31,75	11,72	13,17

Pada tabel diatas ,diuraikan mengenai hasil simulasi hubung singkat pada *circuit breaker* (CB) interkoneksi bus sinkron 33 kV pada masing-masing metode integrasi. Secara umum, serupa besar kapasistas hubung singkat *circuit breaker* yang dibutuhkan untuk masing-masing metode integrasi memiliki besar nilai yang bervariasi. Namun jika ditinjau dari nilai puncak arus hubung singkat (Ip), metode integrasi dengan penambahan trafo isolasi memiliki nilai lebih rendah jika dibandingkan tanpa penggunaan trafo isolasi.

4.4 Perbandingan Biaya Investasi Antar Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan

Setelah mendapatkan hasil dari analisis aliran daya, kontingensi dan hubung singkat, maka dapat ditentukan spesifikasi peralatan (*switchgear*) yang diperlukan dari masing-masing metode integrasi dengan disesuaikan pada ketersediaan peralatan di pasaran. Keseluruhan informasi untuk setiap komponen didapatkan dari mencari informasi dari internet dan dengan menanyakan ke distributor. Estimasi nilai harga peralatan busbar, *circuit breaker*, dan trafo isoasi disajikan sebagai berikut.

Tabel 4.48 Estimasi Harga Peralatan (Busbar, *Circuit Breaker*, dan Trafo Isoasi)

Item	Estimasi Harga (Rp)
Busbar	
-Busbar 33kV ;1250 A	57.473.200
Circuit Breaker	
-Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	14.368.300
-Vacum circuit Breaker 33kV ; 2500 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	43.104.900
-Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	43.104.900
-Vacum circuit Breaker 33kV ; 1250 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	57.473.200
Trafo Isolasi	
-Trafo Isolasi 33kV/33kV 16 MVA	517.258.800

Selanjutnya, dilakukan perhitungan dan perbandingan estimasi biaya investasi yang dibutuhkan dari masing-masing metode integrasi yang dirangkum pada tabel 4.43.

Tabel 4.49 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi Masing-Masing Metode Integrasi.

Konfigurasi	Item	Jumlah	Estimiasi Harga (Rp)
Sectionalized Single Bus	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	16	689.678.400
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 1250 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	1	57.473.200
Total Harga (Rp)			**1.034.517.600**

Tabel 4.50 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi Masing-Masing Metode Integrasi.

Konfigurasi	Item	Jumlah	Estimiasi Harga (Rp)
Double Breaker Double Bus	Busbar 33kV ;1250 A	2	114.946.400
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	27	1.163.832.300
Total Harga (Rp)			**1.278.778.700**
One Half Breaker	Busbar 33kV ;1250 A	2	114.946.400
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	24	1.034.517.600
Total Harga (Rp)			**1.149.464.000**
Ring Bus	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	19	818.993.100
Total Harga (Rp)			**1.106.359.100**
Mesh	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 63 kA peak	21	905.202.900
Total Harga (Rp)			**1.192.568.900**
Sectionalized Single Bus dengan Trafo Isolasi	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	11	158.051.300
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 2500 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	6	258.629.400
	Trafo Isolasi	4	2.069.035.200
Total Harga (Rp)			**2.773.081.900**
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	14	201.156.200
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 2500 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	5	215.524.500
	Trafo Isolasi	5	2.586.294.000
Total Harga (Rp)			**3.290.340.700**
Mesh dengan Trafo Isolasi	Busbar 33kV ;1250 A	5	287.366.000
	Vacum circuit Breaker 33kV ; 630 A ; 50 Hz ; 50 kA peak	21	301.734.300
	Trafo Isolasi	6	3.103.552.800
Total Harga (Rp)			**3.692.653.100**

Ditinjau dari tabel diatas, metode integrasi dengan *sectonilized single bus* memiliki estimasi nilai biaya investasi terendah sebesar Rp1.034.517.600 Sedangkan estimasi nilai biaya investasi tertinggi yaitu pada *Mesh* dengan trafo isolasi yakni sebesar Rp3.692.653.100. Hal ini mengingat biaya investasi untuk trafo isolasi yang cukup tinggi.

4.5 Analisis Perbandingan Metode Integrasi *Power System Island*

Pada analisis ini akan dilakukan penilaian dari parameter yang sudah didapatkan sebelumnya untuk selanjutnya dapat dibandingkan dan diketahui metode integrasi yang sesuai dengan pertimbangan keandalan, ekonomi, dan fleksibilitas operasi. Penilaian yang dilakukan yakni berdasarkan kondisi terburuk hingga terbaik. Pada parameter profil tegangan nilai terendah diberikan pada kondsi besar drop tegangan yang besar hingga nilai tertinggi pada kondisi tengangan dengan drop yang lebih kecil mendekati kondisi tegangan normal 100%. Untuk parameter rug-rugi daya diberikan nilai terendah pada kondisi rugi-rugi daya yang tinggi hingga rugi-rugi daya yang lebih kecil. Pada faktor fleksibilitas operasi dilakukan penilian berdasarkan jumlah kemungkinan terjadinya kondisi *islanding* saat dilakukan kontingensi (N-1) dengan nilai terendah diberikan pada kondisi terjadinya *islanding* terbanyak. Penilaian ekonomi didasarkan pada nilai harga, dimana nilai terendah diberikan pada nilai harga yang lebih mahal hingga nilai harga yang murah. Selanjutnya masing-masing parameter akan dilakukan penjumlahan nilai untuk dapat dilakukan perbandingan sebagi berikut.

Tabel 4.51 Perbandingan Metode Integrasi *Power System Island* Berdasarkan Keandalan, Fleksibilitas Operasi, dan Ekonomi.

	Keandalan				**Fleksibi-litas operasi**	**Ekonomi**	
Tipe	Profil Tegangan Kondisi Normal (kV)	Profil Tegangan Kondisi Kontingensi (kV)	Rugi-rugi daya Kondisi Normal (MW)	Rugi-rugi daya Kondisi Kontingensi (MW)	Kemungkinan terjadi *islanding* saat kontingensi (N-1)	Estimasi Biaya Inestasi (Rp)	**Nilai**
Sectionalized Single Bus	98,1 %	88,3%	0,678	1,391	4	1.034.517.600	**19**
Nilai	**1**	**3**	**4**	**2**	**1**	**8**	
Double Breaker Double Bus	98,1 %	96,70%	0,677	0,845	0	1.278.778.700	**17**
Nilai	**1**	**5**	**5**	**4**	**2**	**4**	
One and Half Breaker	98,1 %	96,70%	0,677	0,845	0	1.149.464.000	**23**
Nilai	**1**	**5**	**5**	**4**	**2**	**6**	
Ring Bus	98,1 %	96,70%	0,677	0,841	0	1.106.359.100	**25**
Nilai	**1**	**5**	**5**	**5**	**2**	**7**	
Mesh	98,1 %	96,70%	0,677	0,841	0	1.192.568.900	**23**
Nilai	**1**	**5**	**5**	**5**	**2**	**5**	
Sectionalized Single Bus dengan Trafo Isolasi	98,2 %	66,40%	0,746	2,285	4	2.773.081.900	**10**
Nilai	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**3**	
Ring Bus dengan Trafo Isolasi	98,8 %	58,50%	0,708	2,285	0	3.290.340.700	**11**
Nilai	**3**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	
Mesh dengan Trafo Isolasi	98,8 %	80,80%	0,707	1,307	0	3.692.653.100	**16**
Nilai	**3**	**4**	**3**	**3**	**2**	**1**	

Dari tabel 4.45 , didapatkan nilai perbandingan dari tiap metode integrasi yang ditinjau berdasarkan keandalan, fleksibilitas operasi, dan besar nilai etimasi biaya investasi dengan memberikan penilaian berdasarkan besar nilai terbaik dari masing-masing aspek yang dibandingkan. Sehingga dapat diketahui, metode konfigurasi *ring bus* memiliki keandalan, fleksibilitas operasi, dan biaya investasi yang paling baik untuk diterapkan dalam mengintegrasikan *island* sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. Metode integrasi berupa *ring bus* juga merupakan tipe konfigurasi eksisting yang digunakan untuk mengintegrasikan sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur saat ini.

Tabel 4.52 Perbandingan Keandalan Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.

No	Tipe	Keandalan (Nilai)
1	*Ring Bus*	16
2	*Mesh*	16
3	*One and Half Breaker*	15
4	*Double Breaker Double Bus*	15
5	*Sectionalized Single Bus*	12
6	*Mesh* dengan Trafo Isolasi	12
7	*Ring Bus* dengan Trafo Isolasi	6
8	*Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi	7

Pada tabel 4.46 , Jika ditinjau berdasarkan keandalan, terdapat tiga metode integrasi dengan tingkat keandalan tertinggi yaitu pada konfigurasi *ring bus dan mesh.* Hal ini didasarkan pada profil tegangan dan nilai rugi-rugi daya pada konfigurasi tersebut.

Tabel 4.53 Perbandingan Fleksibilitas Operasi Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.

No	Tipe	Fleksibilitas Operasi (Nilai)
1	*One and Half Breaker*	2
2	*Double Breaker Double Bus*	2
3	*Ring Bus*	2
4	*Mesh*	2
5	*Ring Bus* dengan Trafo Isolasi	2
6	*Mesh* dengan Trafo Isolasi	2
7	*Sectionalized Single Bus*	1
8	*Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi	1

Pada tabel 4.47, Jika ditinjau berdasarkan Fleksibilitas Operasi, sebagian besar metode integrasi memiliki nilai fleksibilitas yang cukup baik karena dapat mejaga kontinuitas aliran daya saat dilakukan kontingensi (N-1) pada unit pembangkitan dan masing-masing saluran interkoneksi. Namun untuk metode integrasi *sectionalized single bus* masih memiliki kemungkinan terjadinya *islanding* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sehingga memiliki nilai fleksibilitas operasi yang rendah.

Tabel 4.54 Perbandingan Nilai Ekonomi Metode Integrasi *Island* Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.

No	Tipe	Estimasi Biaya Invetasi (Rp)
1	*Sectionalized Single Bus*	1.034.517.600
2	*Ring Bus*	1.106.359.100
3	*One and Half Breaker*	1.149.464.000
4	*Mesh*	1.192.568.900
5	*Double Breaker Double Bus*	1.278.778.700
6	*Sectionalized Single Bus* dengan Trafo Isolasi	2.773.081.900
7	*Ring Bus* dengan Trafo Isolasi	3.290.340.700
8	*Mesh* dengan Trafo Isolasi	3.692.653.100

Tabel 4.48 diatas menunjukkan perbandingan nilai Estimasi harga dari masing-masing metode integrasi untuk membandingkan metode integrasi berdasarkan aspek ekonomis. Dapat diketahui bahwa konfigurasi *sectionalized single bus* merupakan metode integrasi yang paling ekonomis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari seluruh kegiatan penelitian dalam tugas akhir mengenai perbandingan metode integrasi *power system island* dengan pertimbangan keandalan, ekonomi, dan fleksibilitas operasi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode integrasi *power system island* yang direkomendasikan untuk diterapkan pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan pertimbangan keandalan, ekonomi dan fleksibilitas operasi yakni menggunakan konfigurasi *ring bus* dimana memiliki niliai tertinggi dengan total nilai sebesar 25.
2. Ditinjau dari keandalan sistem, berdasarkan profil tegangan dan rugi-rugi daya, maka konfigurasi *ring bus dan mesh* memiliki nilai keandalan paling tinggi dengan total nilai sebesar 16.
3. Berdasarkan fleksibilitas operasi, hanya *sectionalized single bus* yang tidak dapat mempertahankan kontinuitas aliran daya ketika dilakukan kontingensi (N-1) pada unit pembangkitan dan saluran interkoneksi.
4. Dari segi ekonomi, konfigurasi *sectionalized single bus* memiliki nilai biaya investasi terendah sebesar Rp1.034.517.600.

5.2 Saran

Berdasarkan tugas akhir ini, saran dan pengembangan untuk tugas akhir yang akan datang dengan topik yang serupa sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pertimbangan keandalan dengan mempertimbangkan respon tegangan, respon frekuensi, dan sudut rotor dari masing-masing *power system island* yang saling terintegrasi.
2. Dapat dilakukan perbandingan pada metode integrasi yang lain dengan menggunakan reaktor.
3. Melakukan perbandingan metode integrasi *power system island* pada sistem yang lebih besar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Pujiantara, V. R. Mahindara, B. Fachrurriza, A. Priyadi, and M. H. Purnomo, "The Design of RBMP Technique to Limit The Fault Current and Voltage Dip in Medium Voltage Electrical System Application," in *2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Surabaya, Indonesia, 2019, pp. 159–164.

[2] C. T. Abipudya, "Studi Stabilitas Transien pada Integrasi Sistem Kelistrikan PT Pupuk Kalimantan Timur (PKT) Akibat Penambahan Pabrik PKT-5," Surabaya, 2010.

[3] M. E. El-Hawary, *Electrical power systems: design and analysis*, Rev. printing. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.

[4] D. Suswanto, "Sistem Distribusi Tenaga Listrik," p. 327.

[5] P. Jarmo, "Lappeenranta University of Technology School of energy System Electrical Engineering Master's Thesis Design of *Power substation* in Prionezhsky Region, " 2017.

[6] T. Gonen, "Modern Power System Analysis, Second Edition," p. 725.

[7] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power system analysis and design*. Stamford, CT: Cengage Learning, 2012.

[8] Grainger, JJ, Stevenson, W.D.1994. *Elements of Power Systems Analysis*, 4th. Ed. McGraw-Hill Book Company, New ork.55-61

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Baharuddin Aulia Ma'ruf, lahir di Pasuruan pada tanggal 19 April 1998. Penulis merupakan lulusan dari SDN 2 Sidokumpul Gresik, SMPN 1 Gresik dan SMAN 1 Gresik. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan studinya di Teknik Elektro ITS dan memilih bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan, penulis aktif dalam mengikuti berbagai kegiatan dan organisasi dalam kampus. Penulis pernah aktif menjadi anggota tim ITS Marine Solar Boat dalam divisi *electrical engineer* dan menjadi asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) selama 2 tahun terakhir. Selama menjadi asisten laboratorium, penulis pernah menjadi trainer untuk pelatihan *software* ETAP dan juga aktif dalam berbagai proyek diantaranya yaitu proyek Studi Evaluasi Sistem Ptorteksi dan Transient Stability Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU III Plaju, serta proyek Master Plant Sistem Distribusi Jambi, Bengkulu, Lahat, Muara bungo Unit Induk Wilayah Sumatera Selatan. Penulis, dapat dihubungi melalui baharuddin16@mhs.ee.its.ac.id.