TUGAS AKHIR – EE 184801

PENENTUAN KONFIGURASI TRANSPOSISI PADA SALURAN TRANSMISI SULAWESI 275 kV UNTUK MENGURANGI KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN

Aldy Yuniar Pratama
NRP 07111640000149

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TUGAS AKHIR – EE 184801

PENENTUAN KONFIGURASI TRANSPOSISI PADA SALURAN TRANSMISI SULAWESI 275 KV UNTUK MENGURANGI KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN

Aldy Yuniar Pratama
NRP 07111640000149

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Instrumentasi Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – EE 184801

DETERMINING TRANSPOSITION CONFIGURATION ON SULAWESI 275 KV TRANSMISSION LINE FOR VOLTAGE UNBALANCE REDUCTION

Aldy Yuniar Pratama
NRP 07111640000149

Supervisor(s)
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN KEASLIAAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Penentuan Konfigurasi Transposisi pada Saluran Transmisi Sulawesi 275 kV untuk Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan**" 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.

Surabaya, 10 Juli 2020

Aldy Yuniar Pratama
NRP. 0711 16 4000 0149

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENENTUAN KONFIGURASI TRANSPOSISI PADA SALURAN TRANSMISI SULAWESI 275 KV UNTUK MENGURANGI KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN

TUGAS AKHIR

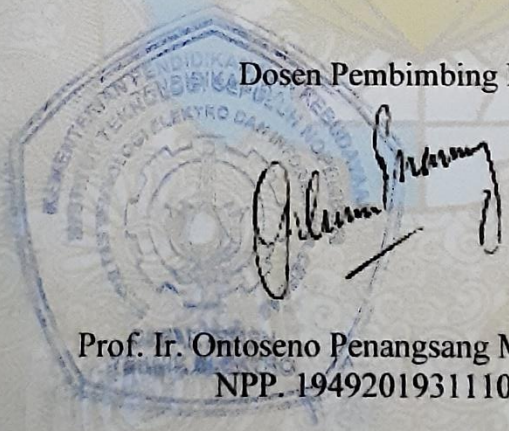
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D
NPP. 19492019311110

SURABAYA
JULI, 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENENTUAN KONFIGURASI TRANSPOSISI PADA SALURAN TRANSMISI SULAWESI 275 KV UNTUK MENGURANGI KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN

TUGAS AKHIR

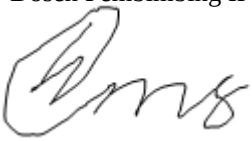
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II



Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP. 198811082012121001

SURABAYA
JULI, 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Penentuan Konfigurasi Transposisi pada Saluran Transmisi Sulawesi 275 kV untuk Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan

ABSTRAK

Nama Mahasiswa	: Aldy Yuniar Pratama
NRP	: 07111640000149
Dosen Pembimbing I	: Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NPP	: 19492019311101
Dosen Pembimbing II	: Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP	: 198811082012121001

Saluran transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa merupakan *backbone* transmisi yang menyalurkan pasokan daya listrik ke sistem interkoneksi Sulawesi Bagian Selatan dan Sulawesi Tengah. Sistem interkoneksi Sistem Sulbagsel – Sulteng menyalurkan daya dari pembangkit PLTA Poso 3 x 65 MW melalui saluran transmisi dengan panjang bentangan kurang lebih 209 kms dari Kabupaten Poso hingga Kota Palopo. Dari total bentangan saluran transmisi tersebut terdapat perbedaan ketidakseimbangan tegangan mencapai 7 kV pada salah satu phasa konduktor. Hal tersebut mengakibatkan permasalahan pada kondisi operasi sistem seperti meningkatnya rugi-rugi saluran dan pemanasan pada transformer serta penurunan performansi dari relay pengaman pada sistem. Untuk mengurangi ketidakseimbangan tegangan yang terjadi dapat dilakukan transposisi pada saluran transmisi tersebut. Dalam tugas akhir ini, studi transposisi dilakukan untuk mengetahui penyebab ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa dengan mempertimbangkan *Line Voltage Unbalance Rate* (LVUR) dan menentukan konfigurasi transposisi pada sistem tranmisi sehingga ketidakseimbangan tegangan akan turun sesuai standar LVUR yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil analisis, konfigurasi transposisi dapat menurunkan nilai LVUR paling rendah dicapai pada angka 0,04%. Dengan semakin rendahnya nilai LVUR maka ketidakseimbangan tegangan sistem dapat berkurang.

Kata Kunci : Transposisi Saluran Transmisi, Voltage Unbalance, LVUR

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Determining Transposition Configuration on Sulawesi 275 kV Transmission Line for Voltage Unbalance Reduction

ABSTRACT

Name	: Aldy Yuniar Pratama
NRP	: 07111640000149
Supervisor I	: Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NPP	: 19492019311101
Supervisor II	: Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP	: 198811082012121001

The 275 kV Pamona - Wotu - Latuppa transmission line is a transmission backbone that supplies electric power supply to the interconnection systems of Southern and Central Sulawesi. Interconnection system The Sulbagsel - Central Sulawesi system transfers power from the 3 x 65 MW Poso hydropower plant through a transmission line with a length of approximately 209 kms from Poso Regency to Palopo City. From the total stretch of the transmission line, there are differences in voltage unbalance reaching 7 kV in one of the conductor phases. This results in problems with the system operating conditions such as increased line losses and heating on the transformers and decreased performance of the protection relays on the system. To reduce the voltage unbalance that occurs, transposition can be done on the transmission line. In this final project, a transposition study is carried out to determine the cause of voltage unbalance in the 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa transmission line by considering the Line Voltage Unbalance Rate (LVUR) and determining the transposition configuration in the transmission system so that the voltage unbalance will be reduced according to the specified LVUR standard. Based on the analysis results, the transposition can reduce the LVUR to lowest value achieved at 0,04%. With the lower value of LVUR, the system voltage unbalance can be reduced.

Keywords : Transmission Line Transposition, Voltage Unbalance, LVUR

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat, kasih dan anugerah-Nya semata, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul " Penentuan Konfigurasi Transposisi Pada Saluran Transmisi Sulawesi 275 kV Untuk Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan" dengan lancar, baik dan tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1, Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmatnya kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

2. Kedua orang tua dan adik-adik penulis yang tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis.

3. Prof. Ontoseno Penangsang dan Bapak Dimas Fajar Uman selaku Dosen Pembimbing, terima kasih atas segala bimbingan, perhatian,dan arahan selama pengerjaanTugas Akhir.

4. Bapak dan Ibu dosen pengajar Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan materi, bersedia berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman berguna kepada penulis.

5. Fake Friends (Veryl, Yohan, Vito, Bariq , Jojo, dan Hari) yang telah mengisi hari – hari penulis selama di PSSL. Mas dan Mbak Asisten 2014 dan 2015 yang memberikan ilmu dan hari-hari indah tak terlupakan serta adik-adik Trainee 2017.

Akhirnya, penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka oleh saran dan masukan yang bersifat membangun agar penulis dapat menghasilkan karya yang lebih baik di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
PERNYATAAN KEASLIAAN TUGAS AKHIR i
HALAMAN PENGESAHAN 1 iii
HALAMAN PENGESAHAN 2 v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xvii
BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1
1.2. Permasalahan 2
1.3. Tujuan 2
1.4. Batasan 2
1.5. Metodologi 3
1.6. Sistematika Penulisan 4
1.7. Relevansi 5

BAB II TRANSPOSISI 7

2.1. Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan 7
2.2. Analisis Aliran Daya 7
2.3. Ketidakseimbangan Tegangan 8
2.4. Induktansi dan Reaktansi Induktansi 9
2.4. Transposisi 11

BAB III PEMODELAN SISTEM 13

3.1. Metodologi Penelitian 13
3.2. Overview Sistem Kelistrikan 15
3.3. Analisis Fenomena Ketidakseimbangan Tegangan 17

3.3.1 Perhitungan Resistansi 22
3.3.2 Perhitungan Reaktansi (x) 24

3.4. Pemodelan Konfigurasi Sistem 29

3.4.1 *Double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu 30
3.4.2 *Double circuit* terhubung ke GI Wotu..... 34
3.4.3 Perbandingan Nilai Persen Ketidakseimbangan..... 37

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS..... 41

4.1. Konfigurasi Sistem Baru 41
4.2. Konfigurasi Sistem Baru dengan Transposisi..... 42

4.2.1 Konfigurasi Transposisi 1 42
4.2.2 Konfigurasi Transposisi 2 46
4.2.3 Konfigurasi Transposisi 3 49

4.3. Analisis Hasil Simulasi..... 51

BAB V PENUTUP..... 54

5.1. Kesimpulan..... 54
5.2. Saran..... 55

DAFTAR PUSTAKA 56
LAMPIRAN..... 58

Lampiran 1 58
Lampiran 2 65
Lampiran 3 71

RIWAYAT HIDUP..... 79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 *Single Line Diagram* Sulawesi bagian Selatan 7
Gambar 2. 3 Transposisi metode saluran 1/3-1/3-1/3..... 11
Gambar 2. 3 Transposisi metode saluran *1/6-1/3-1/3-1/6* 11

Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian 13
Gambar 3. 2 Data Ketidakseimbangan sistem Sulbagsel..... 15
Gambar 3. 3 Konfigurasi saluran transmisi 275 kV *Eksisting*..... 17
Gambar 3. 4 Aliran Daya Saluran Transmisi 275 kV..... 18
Gambar 3. 5 Data Pengukuran OHL menuju Latuppa..... 18
Gambar 3. 6 Data Pengukuran OHL menuju Pamona-1..... 19
Gambar 3. 7 Pemodelan Konfigurasi *eksisting*..... 19
Gambar 3. 8 Konstruksi tower 275 kV..... 22
Gambar 3. 9 Resistansi setiap saluran Latuppa-Wotu-Pamona Eksisting 24
Gambar 3. 10 Arus Setiap Saluran Latuppa-Wotu-Pamona 26
Gambar 3. 11 Visualisasi konduktor Matriks 27
Gambar 3. 12 Konfigurasi *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu 30
Gambar 3. 13 Konfigurasi *double circuit* terhubung ke Wotu 34

Gambar 4. 1 Perbandingan konfigurasi *eksisting* dan konfigurasi baru41
Gambar 4. 2 Konfigurasi Transposisi 1..... 42
Gambar 4. 4 Konfigurasi transposisi 2 46
Gambar 4. 6 Konfigurasi transposisi 3 49

Gambar Lampiran 2. 1 Overview Tower Sistem Transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa 66
Gambar Lampiran 2. 2 Letak Titik Transposisi D 67
Gambar Lampiran 2. 3 Letak Titik Transposisi C 68
Gambar Lampiran 2. 4 Letak Titik Transposisi B 69
Gambar Lampiran 2. 5 Letak Titik Transposisi A 70

Gambar Lampiran 3. 1 Hasil LF Unbalance tanpa terhubung ke GI Wotu – no load 71
Gambar Lampiran 3. 2 Hasil LF Unbalance tanpa terhubung ke GI Wotu – *on load* 72
Gambar Lampiran 3. 3 Hasil LF Unbalance terhubung ke GI Wotu – no load 73
Gambar Lampiran 3. 4 Hasil LF Unbalance terhubung ke GI Wotu – on load 74
Gambar Lampiran 3. 5 Hasil LF Unbalance Konfigurasi Transposisi 1 75
Gambar Lampiran 3. 6 Hasil LF Unbalance Konfigurasi 2 76
Gambar Lampiran 3. 7 Hasil LF Unbalance Konfigurasi transposisi 3 77

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 LVUR sistem *eksisting* 16
Tabel 3. 2 Parameter tower transmisi 20
Tabel 3. 3 Perbandingan *mutual reactance* Fase 1 dan Fase 2 26
Tabel 3. 4 LVUR *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu – no load 31
Tabel 3. 5 LVUR *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu – on load 32
Tabel 3. 6 LVUR *double circuit* terhubung ke GI Wotu – no load 34
Tabel 3. 7 LVUR *double circuit* terhubung ke GI Wotu – on load 36
Tabel 3. 8 Perbandingan LVUR antar konfigurasi 38

Tabel 4. 1 LVUR konfigurasi Transposisi 1 43
Tabel 4. 2 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 1 – Transposisi Jalur Wotu- Pamona 45
Tabel 4. 3 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 1 – Transposisi Jalur Wotu- Pamona 45
Tabel 4. 4 LVUR konfigurasi transposisi 2 46
Tabel 4. 5 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan Konfigurasi 2 – Transposisi Jalur Latuppa- Wotu 48
Tabel 4. 6 Perbandingan Admintansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 2 – Transposisi Jalur Latuppa- Wotu 48
Tabel 4. 7 LVUR konfigurasi transposisi 3 49
Tabel 4. 8 Perbandingan Resistansi Per Phasa Per 1 km hasil simulasi Rekomendasi 3 – Transposisi Latuppa-Wotu dan Wotu-Pamona 51
Tabel 4. 9 Perbandingan Admitansi Per Phasa Per 1 km hasil simulasi konfigurasi 3 – Transposisi Latuppa-Wotu dan Wotu-Pamona 51
Tabel 4. 10 Perbandingan LVUR antar konfigurasi transposisi 52

Tabel Lampiran 2. 1 Titik transposisi pada sistem Sulbagsel 65

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem Tenaga Listrik Sulawesi terdiri atas 4 sistem besar dan beberapa sistem kecil / isolated dengan total kapasitas pembangkitan mencapai 1800 MW dengan beban puncak total ± 1638 MW. Sistem kelistrikan Sulawesi terdiri dari Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) dan Sistem Sulawesi Utara & Gorontalo (Sulutgo). Kedua sistem kelistrikan tersebut merupakan 2 sistem kelistrikan terbesar di Sulawesi dengan beban puncak Sistem Sulbagsel sebesar 1138.2 MW (pada tanggal 9 Agustus 2018) dan Sistem Sulutgo sebesar 363.9 MW (14 Mei 2018).

Saluran transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa merupakan backbone transmisi yang menyalurkan pasokan daya listrik ke sistem interkoneksi Sulbagsel dan Sulteng. Sistem Sulbagsel – Sulteng menyalurkan daya dari pembangkit PLTA Poso 3 x 65 MW melalui saluran transmisi dengan panjang kurang lebih 209 kms dari Kabupaten Poso hingga Kota Palopo. Akibat total bentangan saluran transmisi tersebut terdapat perbedaan tegangan mencapai 7 kV pada salah satu phasa konduktor yang menimbulkan ketidakseimbangan tegangan pada sistem kelistrikan. Ketidakseimbangan tegangan sangat dihindari karena akan menimbulkan kerugian, seperti *overheat* pada motor, timbulnya harmonisa, bertambahnya rugi-rugi saluran serta merusak peralatan elektronika daya dan juga variable speed drive [1] [2]. Selain itu, performansi relay proteksi pada saluran transmisi akan terganggu [3]. Untuk mengurangi ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi tersebut salah satunya menggunakan transposisi. Transposisi adalah suatu cara untuk menyeimbangkan impedansi dan admitansi pada saluran transmisi jarak jauh dengan cara mengubah posisi setiap phasa konduktor [4].

Dalam tugas akhir ini akan membahas mengenai studi transposisi dengan menganalisis penyebab terjadinya ketidakseimbangan tegangan saluran atau *voltage unbalance* yang terjadi pada saluran transmisi di sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) dengan mempertimbangkan nilai ketidakseimbangan tegangan saluran. LVUR [5] merupakan parameter yang digunakan sebagai ukuran dalam tingkat ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi . Dengan

penentuan konfigurasi transposisi pada saluran transmisi tersebut maka diharapkan dapat mengurangi nilai ketidakseimbangan tegangan saluran pada sistem transmisi sesuai dengan nilai LVUR yang telah ditetapkan.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah tentang:

1, Bagaimana mengidentifikasi penyebab terjadinya fenomena unbalance pada sistem transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa?
2. Bagaimana melakukan pemodelan fenomena *unbalance* dalam kondisi *untransposed* dan *transposed*?
3. Bagaimana menentukan konfigurasi transposisi optimal pada saluran transmisi 275 kV Pamona – Wotu - Latuppa untuk mengurangi ketidakseimbangan tegangan ?

1.3. Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk memodelkan dan melakukan simulasi aliran daya 3 phasa menggunakan *software* ETAP dan menentukan penyebab terjadinya fenomena ketidakseimbangan tegangan sehingga dapat menentukan konfigurasi optimal transposisi pada sistem transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa untuk mengurangi pengaruh ketidakseimbangan tegangan yang terjadi.

1.4. Batasan

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini terdapat batasan yang diperlukan, yaitu:

1. Analisa ketidakseimbangan tegangan dilakukan pada sistem transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa dan saluran-saluran yang terkait (Poso, Pasang Kayu, Silae, Sidera, Talise, Parigi)
2. Konfigurasi transposisi yang ditampilkan pada BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS tanpa mempertimbangkan faktor keekonomian.
3. Data yang digunakan berdasarkan data yang diperoleh dari PT. PLN UIKL Sulawesi Tahun 2019

1.5. Metodologi

Tahapan pengerjaan yang dilakukan pada studi Penentuan Konfigurasi Transposisi pada Saluran Transmisi Sulawesi 275 kV untuk Mengurangi Ketidakseimbangan Tegangan adalah:

1, Studi Literatur

Tahap awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah dilakukan pengkajian *textbook*, artikel ilmiah dan jurnal untuk mendapatkan data-data dan informasi yang diperlukan.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini, data sekunder dari PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi dikumpulkan untuk keperluan pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik. Data tersebut adalah *Single Line Diagram* (SLD), Data saluran dan kontruksi tower transmisi tegangan 275 kV dan 150 kV, beban dan aliran daya saat beban puncak malam dan beban puncak siang, serta data ketidakseimbangan tegangan 275 kV , 150 kV dan 20 kV.

3. Pemodelan Sistem *Eksisting* dan Simulasi

Pada tahap ini, data yang sudah dikumpulkan akan dilanjutkan ke perhitungan serta dimodelkan menggunakan *software* ETAP 12.6. Pada tahap pemodelan ini di fokuskan pada pemodelan saluran transmisi menggunakan analisis aliran daya 3 phasa.

4. Analisis Load Flow

Dari hasil simulasi akan divalidasi, apakah sudah sesuai dengan kondisi *eksisting*. Apabila sudah sesuai dengan kondisi yang ada dan simulasi *load flow* sudah menunjukkan bahwa sistem konvergen maka data hasil simulasi ini akan digunakan pada langkah langkah selanjutnya.jika tidak kembali ke pemodelan sistem *eksisting* dan simulasi.

5. Analisis Transposisi

Pada tahap ini dilakukan simulasikan menggunakan analisis aliran daya 3 phasa. Sehingga dari hasil simulasi tersebut diperoleh nilai tegangan phasa – phasa pada setiap phasa dan diperoleh nilai persen ketidakseimbangan tegangan pada kondisi sistem *transposed* dan *untransposed.*

6. Penentuan Konfigurasi Transposisi

Setelah dilakukan analisis transposisi maka ditentukan case-case konfigurasi yang optimal yang memberikan hasil LVUR paling rendah.

7. Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan setelah tahapan-tahapan diatas telah dilakukan dan sesuai dengan menjawab perumusan masalah dan tujuan yang telah disebutkan diatas.

8. Penyusunan Laporan

Laporan dapat disusun setelah semua tahap diatas telah selesai. Laporan disusun sesuai dengan acuan yang telah ditentukan.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada buku tugas akhir ini terdiri dari lima bab, dimana pokok bahasan tiap babnya adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan.

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi pada tugas akhir.

BAB II *Transposisi*

Pada bab ini dijelaskan mengenai teori unit commitment dan constrain-constrain yang berhubungan dengan topik penelitian tugas akhir yaitu security constrained unit commitment. Dijelaskan juga data input yang digunakan sebagai dasar pemilihan output terbaik dari penelitian ini.

BAB III Pemodelan Sistem

Pada bab ini dijelaskan mengenai pemodelan dan review sistem *eksisting* yang menyebabkan terjadinya fenomena ketidakseimbangan yang terjadi pada sistem kelistrikan Sulbagsel.

BAB IV Simulasi dan Analisis.

Pada bab ini dijelaskan hasil simulasi dengan menggunakan metode transposisi untuk mengatasi ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada sistem kelistrikan Sulbagsel

BAB V Penutup

Pada bab ini penulis akan memberikan hasil dan menarik kesimpulan terhadap penelitian yang telah dilakukan dan memberikan rekomendasi serta saran yang dapat di implementasikan pada penelitian mendatang.

1.7. Relevansi

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat, antara lain:

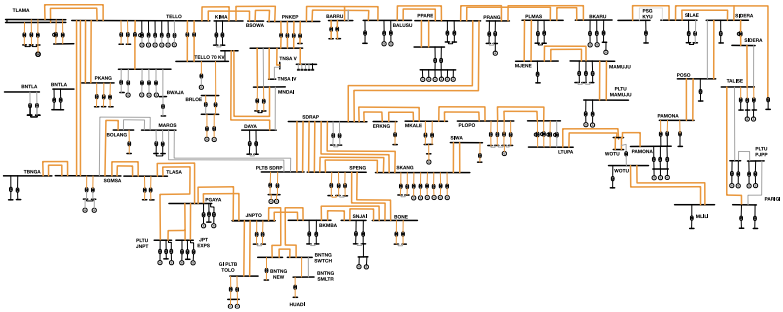
1, Dapat mengatasi permasalahan ketidakseimbangan yang terjadi pada sistem transmisi 275 kV pada sistem Sulawesi bagian Selatan
2. Dapat menambah wawasan mengenai permasalahan - permasalahan dalam sistem transmisi tenaga listrik khususnya fenomena ketidakseimbangan tegangan
3. Dapat menjadi referensi bagi akademisi/mahasiswa untuk melakukan penelitian dengan topik terkait

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TRANSPOSISI

2.1. Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan

Sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) terdiri dari 11 kompleks pembangkit dan 72 bus, sesuai dengan Gambar 2. 1 Berdasarkan data dari UP2B Makassar, besarnya pembangkitan total generator pada beban puncak siang mencapai 994.24 MW dengan pembangkitan generator 1032.43 MW sedangkan pada beban puncak malam mencapai 1144.38 dengan pembangkitan generator 1165.28.



Gambar 2. 1 *Single Line Diagram* Sulawesi bagian Selatan

2.2. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya atau *Load Flow* adalah studi yang bertujuan untuk menghitung nilai tegangan pada setiap bus. Selain itu analisis ini sangat esensial digunakan untuk mengetahui daya atau arus pada saluran atau sistem dengan pembebanan tertentu, sehingga analisis aliran daya ini dapat digunakan untuk operasi dan pengendalian operasi serta perencanaan [1]. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan dalam analisis aliran daya, seperti metode Newton-Raphson, Fast Decoupled, Gauss-Seidel, dan Modified Gauss-Seidel.

Sistem kelistrikan 3 fasa seimbang merupakan sistem dimana setiap fasa memiliki besar magnitud yang sama dengan perbedaan fasa sebesar 120 derajat. Sehingga, apabila sistem tidak memiliki besar magnitude yang seimbang dan perbedaan sudut fasa tidak mencapai 120 derajat maka sistem kelistrikan tersebut merupakan sistem tidak seimbang

[2] . Dalam pemodelan dan analisis aliran daya 3 fasa tidak seimbang, nilai impedansi saluran diperlukan sebagai parameter keakuratan. Selain itu, fasor tiga fasa tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat dimodelkan ke dalam fasor sistem tiga fasa seimbang sebagai berikut:

- Komponen urutan positif terdiri dari komponen tiga fasa seimbang yang memiliki urutan fasa abc.

- Komponen urutan negatif terdiri dari komponen tiga fasa seimbang yang memiliki urutan fasa terbalik dengan komponen urutan positif yaitu acb.

- Komponen urutan nol terdiri dari komponen tiga fasa tunggal dimana semua besar komponen tiga fasa sama dengan sudut fasa yang sama pula.

Analisis sistem tiga fasa yang seimbang akan lebih mudah. Hal tersebut dikarenakan komponen simetris sudah terpisah dan berdiri sendiri. Selanjutnya analisis dapat diselesaikan dalam bentuk fase tunggal, dan hanya menggunakan model urutan positif. [3] Saluran tiga fase tidak seimbang tidak bisa dilakukan dengan pemodelan fase tunggal karena adanya perbedaan impedansi antar fasa. Sehingga arus dan aliran daya yang dihasilkan pada setiap fasa akan memiliki perbedaan. Oleh karena itu, pada beberapa kondisi, jaringan tiga fasa *unbalance*, tegangan yang tidak seimbang akan dimodelkan sebagai tegangan yang seimbang [4].

2.3. Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan merupakan permasalahan kualitas daya yang biasanya banyak terjadi di sisi tegangan rendah. Meskipun dari sisi penyuplai daya sudah sudah cukup seimbang, namun dari sisi tegangan pada beban bisa muncul perbedaan nilai tegangan akibat impedansi sistem yang tidak seimbang dan tidak seimbangnya pembagian distribusi beban satu phasa. Definisi yang paling tepat dari ketidakseimbangan tegangan adalah rasio antara negative sequence dari komponen tegangan dan positive sequence dari komponen tegangan [5]. Menurut *National Equipment Manufacturer's Association* (NEMA**)** Publication no. MG 1-1993**,** mendefinisikan ketidakseimbangan tegangan dengan *(LVUR),* dengan persamaan (1). Agar sistem berjalan

secara normal dan motor dapat dioperasikan dengan rated capacity maka nilai LVUR tidak lebih dari 1% [6]**.**

$$(\%)\ \text{LVUR} = \frac{\text{Line Voltage - Average Line Voltage}}{\text{Average Line Voltage}} \times 100\ \% \qquad (1)$$

Selain standar yang dikeluarkan oleh NEMA, terdapat juga standar yang dikeluarkan oleh *European Standards* yang dapat digunakan untuk mengetahui derajat ketidakseimbangan, yaitu *voltage unbalance factor* (VUF) yang dimana menghitung perbandingan rasio tegangan *negative sequence* terhadap tegangan *positive sequence.* VUF dapat dinyatakan dimana V1 dan V2 adalah sekuens positif dan sekuens negatif oleh persamaan berikut :

$$(\%)\ \text{VUF} = \frac{V2}{\text{V1}} \times 100\ \%$$

Sistem tidak seimbang terjadi dalam beberapa kondisi [7] dimana salah satunya adalah adanya jaringan yang tidak simetris yang disebabkan oleh saluran transmisi yang tidak ditransposisi. Operasi tidak normal karena lepasnya salah satu (gangguan) atau perbedaan ratio tap pada setiap fase pada transformator tiga fase. Kondisi lainnya yang mungkin terjadi adalah tidak seimbangnya beban konsumen. Hal tersebut yang akhirnya dapat menimbulkan ketidakseimbangan. Ketidakseimbangan impedansi selanjutnya menjadi kontributor utama terjadinya ketidakseimbangan tegangan pada sistem. Dengan adanya ketidakseimbangan tegangan dapat memberikan efek terhadap motor induksi, *adjustable speed drives* (ASDs), dan *power electronic converter* [8].

2.4. Induktansi dan Reaktansi Induktansi

Dalam analisa sistem, sebuah sistem transmisi dapat dapat diketahui melalui resistansi, induktansi atau reaktansi induktansi, kapasitansi, dan reaktansi kapasitansi. Saluran transmisi terbagi menjadi kategori, yaitu saluran udara (*overhead line*) dan saluran bawah tanah (*underground line*). Pada saluran *overhead line* arus mengalir ke luar konduktor satu dan masuk melalui konduktor lainnya. Arus tersebut menyebabkan medan magnetik yang terhubung antar konduktor. Setiap adanya perubahan arus dapat mengakibatkan perubahan fluks yang dapat

memberikan tegangan induksi pada sirkuit [9]. Induktansi tersebut dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$\mathrm{L} = 2.10^{-7}.ln\left(\frac{D_m}{Ds}\right)\frac{H}{m}$$

Dimana,

D_m = *Geometric Mean Distance* (GMD) antar konduktor dalam inchi

D_s = *Geometric Mean Radius* (GMR) konduktor dalam inchi = 0,7788*r* untuk konduktor silindris.

Sehingga reaktansi induktansi dapat diketahui dengan :

$$X_L = \omega.L = \ 2.10^{-7}.ln\left(\frac{D_m}{Ds}\right)\frac{H}{m}$$

Dalam pemodelan konduktor, banyak faktor yang menyertai. Selain keterkaitan antar konduktor, salah satunya adalah induktansi dengan mempertimbangkan *Depth of Earth Return* [10]. Konsep ini mengasumsikan bahwa arus yang mengalir pada sebuah konduktor *i* dapat kembali melalui jalur imajiner yang terletak dibawah konduktor aslinya. Sehingga jarak antar konduktor dan konduktor imajiner menjadi dua kali panjangnya ditambah dengan *skin depth of earth* (*p*) yang dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$X_L = \omega.2.10^{-4}.\left(ln\left(\frac{2\left(H_A + \sqrt[2]{\frac{\rho}{j\omega\mu}}\right)}{GMR}\right)\right)\frac{ohm}{km}$$

Dimana,

$p \ = \ \sqrt[2]{\frac{\rho}{j\omega\mu}}$

$\omega \ = 2\,\pi\,f$

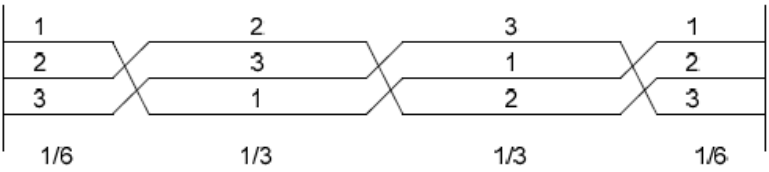
$H_A =$ jarak konduktor ke tanah

Apabila terdapat dua konduktor 3 phasa yang terhubung secara paralel dalam tower yang sama atau *right of way* yang sama akan memunculkan *mutual inductive* antar dua sirkuit [11]. Sehingga matriks konfigurasi tersebut dapat ditulis sebagai :

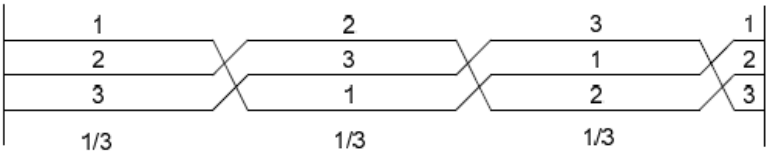
$$X_{ABCDEF} = \begin{bmatrix} X_{AA} & X_{AB} & X_{AC} & X_{AD} & X_{AE} & X_{AF} \\ X_{BA} & X_{BB} & X_{BC} & X_{BD} & X_{BE} & X_{BF} \\ X_{CA} & X_{CB} & X_{CC} & X_{CD} & X_{CE} & X_{CF} \\ X_{DA} & X_{DB} & X_{DC} & X_{DD} & X_{DE} & X_{DF} \\ X_{EA} & X_{EB} & X_{EC} & X_{ED} & X_{EE} & X_{EF} \\ X_{FA} & X_{FB} & X_{FC} & X_{FD} & X_{FE} & X_{FF} \end{bmatrix}$$

2.4. Transposisi

Transposisi adalah sebuah konsep dimana pengubahan urutan phasa dari saluran transmisi untuk mengurangai ketidakseimbangan tegangan maupun arus pada sistem kelistrikan[[12]. Transposisi dilakukan dengan mengubah posisi dari setiap phasa konduktor dengan setiap phasa konduktor tetap mempunyai jarak saluran yang sama. Transposisi dapat dilakukan apabila terdapat saluran dengan panjang lebih dari 100km. Terdapat permodelan transposisi yang paling banyak digunakan, yaitu metode panjang saluran 1/6-1/3-1/3-1/6 dan metode panjang saluran 1/3-1/3-1/3 [13]



Gambar 2. 3 Transposisi metode saluran *1/6-1/3-1/3-1/6*



Gambar 2. 3 Transposisi metode saluran 1/3-1/3-1/3

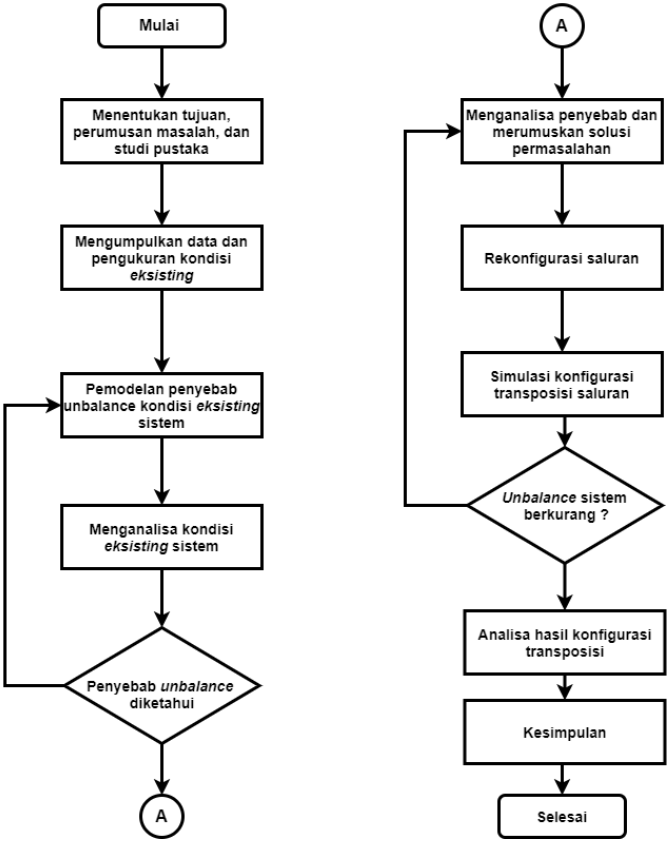
Dapat dilihat pada Gambar 2. 3, urutan transposisi dimulai pada 1/6 total panjang saluran, selanjutnya 1/3 dari panjang total saluran tersebut, selanjutnya adalah 1/3 dari panjang saluran tersebut, dan terakhir 1/6 dari total panjang saluran tersebut. Sedangkan pada gambar 2.3, urutan transposisi dimulai dengan 1/3 panjang saluran total, selanjutnya 1/3 jarak saluran, dan yang terakhir adalah 1/3 panjang saluran paling dekat dengan gardu induk.

Dengan melakukan Transposisi pada phasa konduktor dapat menghasilkan *mutual impedance* yang seimbang dan mengurangi ketidakseimbangan arus beban [14] [15].

BAB III
PEMODELAN SISTEM

3.1. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian merupakan langkah-langkah terstruktur dan sistematis yang akan dilakukan pada penelitian dari awal hingga akhir. Berikut merupakan diagram alir metodologi penelitian pada tugas akhir ini.



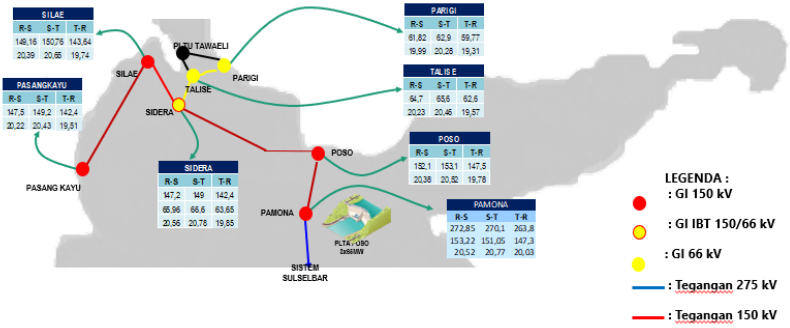
Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian

Berikut ini adalah penjelasan untuk tiap langkah yang tercantum dalam flowchart di atas

Langkah 1 : Penelitian ini diawali dengan menentukan tujuan, rumusan masalah, dan melakukan kajian pustaka terkait topik ini.
Langkah 2 : Melakukan pengumpulan data berupa data saluran, beban, tower, dan pengukuran ketidakseimbangan tegangan. Data tersebut didapat dari PT. UIKL Sulawesi
Langkah 3 : Melakukan pemodelan sistem eksisting melalui data pengukuran yang didapatkan dari langkah 2. Pemodelan dilakukan secara pendekatan matematis untuk melihat kondisi sistem eksisting
Langkah 4: Dari langkah 3 dapat dilakukan analisa mengenai penyebab ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada saluran transmisi 275 kV
Langkah 5: Setelah dari perhitungan dan analisis yang dilakukan, maka didapatkan penyebab ketidakseimbangan yang terjadi pada saluran transmisi 275 kV
Langkah 6: Dengan mengetahui penyebab ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada sistem maka dirumuskan solusi yang diharapkan dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada saluran.
Langkah 7: Kondisi sistem eksisting yang tidak memadai ditunjukkan dengan nilai LVUR yang ada, maka perlu adanya rekonfiugrasi saluran eksisting agar sistem dapat memberikan LVUR dibawah ambang batas.
Langkah 8: Dengan sistem yang telah direkonfigurasi demi mempermudah sebelum akhirnya dilakukannya transposisi. Konfigurasi transposisi yang digunakan menggunakan sistem yang telah direkonfigurasi dengan harapan LVUR pada sistem akan serendah mungkin
Langkah 9: Setelah dilakukan transposisi pada saluran,dilakukan review terhadap konfigurasi transposisi yang telah dilakukan sesuai dengan ambang batas menurut NEMA.
Langkah 10: Menganalisa dan merekapitulasi hasil tiap konfigurasi transposisi. Parameter yang dianalisa yaitu nilai LVUR.
Langkah 11:. Dari analisa yang telah dilakukan pada langkah 10, akan ditarik kesimpulan konfigurasi transposisi paling tepat yang memberikan LVUR paling rendah pada sistem.

3.2. Overview Sistem Kelistrikan

Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan atau biasa disebut dengan sistem kelistrikan Sulbagsel merupakan sistem yang terdiri dari tiga region, yaitu Sulawesi Barat, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Tengah. Pada sistem kelistrikan Sulbagsel timbul fenomena unbalance tegangan yang terjadi pada beberapa Gardu Induk (GI) yang ada pada sistem tersebut. Data ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada Sulbagsel diambil pada bulan September 2019 oleh Pihak PT. PLN Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi yang dapat dilihat pada Gambar 3. 2



Gambar 3. 2 Data Ketidakseimbangan sistem Sulbagsel

Berdasarkan data tersebut, maka dapat diketahui nilai tegangan setiap fasa sehingga dapat dilakukan perhitungan *(%) unbalance* yang mengacu pada standar Line Voltage Unbalanced Rate (LVUR) yang bersumber dari **Nasional Equipment Manufacturer's Association (NEMA)** yang diberikan sesuai dengan Persamaan (1).

Sehingga, dapat diperoleh hasil perhitungan *(%) unbalance* pada sistem *eksisting* dengan mengacu dari hasil data pengukuran untuk 7 gardu induk dapat ditunjukkan pada Tabel 3. 1

Tabel 3. 1 LVUR sistem *eksisting*

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LVUR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Silae	150	149,1	150,7	143,6	147,8	150,76	1,97
	20	20,39	20,65	19,74	20,26	20,65	1,92
Pasang Kayu	150	147,5	149,2	142,4	146,37	149,20	1,94
	20	20,22	20,43	19,51	20,05	20,43	1,88
Parigi	66	61,82	62,9	59,77	61,50	62,90	2,28
	20	19,99	20,28	19,31	19,86	20,28	2,11
Talise	150	64,7	65,6	62,6	64,30	65,60	2,02
	20	20,23	20,46	19,57	20,09	20,46	1,86
Poso	150	152,1	153,1	147,5	150,90	153,10	1,46
	20	20,38	20,52	19,78	20,23	20,52	1,45
Pamona	275	272,8	270,1	263,7	268,9	272,85	1,47
	150	153,2	151,0	147,3	150,5	153,22	1,78
	20	20,5	20,7	20,0	20,44	20,77	1,61
Sidera	150	147,2	149	142,4	146,20	149,00	1,92
	66	65,96	66,6	63,65	65,40	66,60	1,83
	20	20,56	20,78	19,85	20,40	20,78	1,88

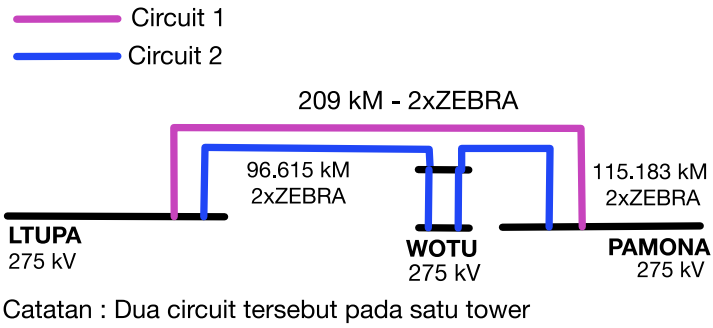
Dapat dilihat pada tabel diatas, sistem *eksisting* Sulbagsel memiliki nilai *(%) unbalance* melebihi ambang batas yaitu 1 % yang memberikan informasi bahwa kondisi *unbalance* tersebut sangat tidak direkomendasikan berdasarkan standar *Nasional Equipment Manufacturer's Association* (NEMA).

3.3. Analisis Fenomena Ketidakseimbangan Tegangan

Fenomena ketidakseimbangan tegangan yang terjadi mulanya dapat diidentifikasi setelah dilakukan penyambungan konfigurasi 275 kV di sistem tersebut. Berdasarkan data *Single Line Diagram* (SLD) bulan Juli tahun 2019 PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi (UIKL) bahwa Saluran transmisi 275 kV sistem Sulbagsel memiliki bentangan panjang total 209 km dengan konfigurasi *single phi.*

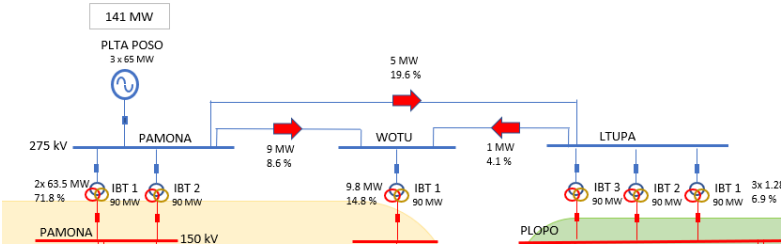
Setelah dilakukan penyambungan, timbul ketidakseimbangan tegangan pada sistem transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa. Disisi lain, ketidakseimbangan beban juga terjadi pada beberapa GI yang lain yakni Silae, Pasang Kayu, Parigi, Talise, Poso dan Sidera. Pada saluran transmisi 275 kV mempunyai dua *circuit,* yang salah satu *circuitnya* terhubung terlebih dahulu ke GI Wotu.

Pada sistem transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa, terdapat sebuah konfigurasi yang jarang ditemui pada saluran transmisi *medium* 275 kV yaitu konfigurasi *double circuit* dimana salah satu circuit dengan jarak tertentu terhubung ke suatu bus beban dan lanjut terhubung ke titik terakhir saluran transmisi sedangkan circuit yang lain langsung menuju ke titik akhir transmisi. Guna mengetahui konfigurasi saluran transmisi *eksisting* dapat ditunjukkan pada Gambar 3. 3.



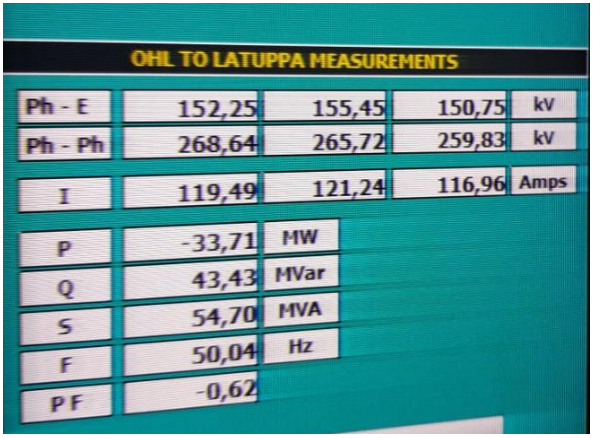
Gambar 3. 3 Konfigurasi saluran transmisi 275 kV *Eksisting*

Berdasarkan hasil simulasi load flow yang dilakukan Divisi operasi Sistem PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi (UIKL) menggunakan *Digsilent* bahwa sistem berpotensi menghasilkan aliran daya tak beraturan yang ditunjukkan pada Gambar 3. 4

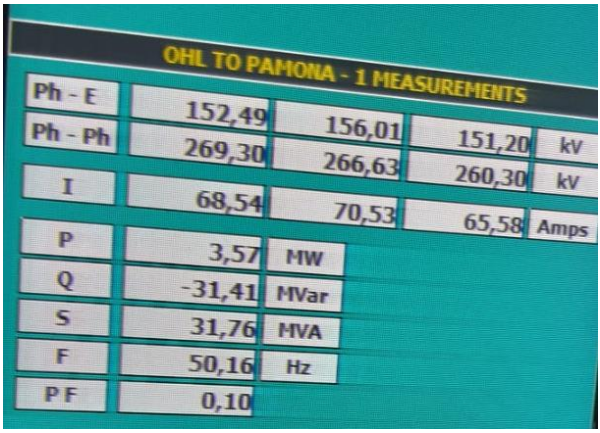


Gambar 3. 4 Aliran Daya Saluran Transmisi 275 kV

Maka dari itu diberikan suatu kasus model aliran daya dan akan dilakukan nilai perhitungan impedansi sehingga dapat dilihat pengaruh aliran daya terhadap nilai impedansi saluran transmisi setiap phasa. Data yang digunakan merupakan data pengukuran sistem.

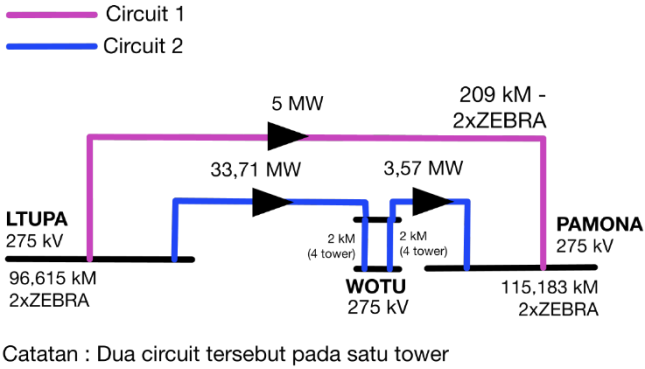


Gambar 3. 5 Data Pengukuran OHL menuju Latuppa



Gambar 3. 6 Data Pengukuran OHL menuju Pamona-1

Sehingga dari data pada Gambar 3. 5 dan Gambar 3. 6 tersebut dapat dimodelkan menjadi diagram seperti pada gambar Gambar 3. 7.



Gambar 3. 7 Pemodelan Konfigurasi *eksisting*

Dengan adanya ketidakseimbangan tegangan, maka diperlukan perhitungan nilai arus pada setiap *segment* saluran untuk mengetahui nilai impedansi yang timbul pada sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan. Pada perhitungan kali ini, diberikan perhitungan nilai arus pada setiap *segment* saluran yang ditunjukkan pada perhitungan Persamaan (2).

$$I = \frac{MVA}{\sqrt{3}\,.\,kV} \tag{2}$$

*Nilai PF dianggap sama dengan *unity*

$$I_{GI\ LATUPPA-GI\ PAMONA} = \frac{5}{\sqrt{3}\,.\,275} = 10{,}49\ A$$
$$I_{GI\ LATUPPA-GI\ WOTU} = \frac{33.71}{\sqrt{3}\,.\,275} = 70{,}77\ A$$
$$I_{GI\ WOTU-GI\ PAMONA} = \frac{3.57}{\sqrt{3}\,.\,275} = 7{,}49\ A$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai impedansi pada setiap phasa dan circuit berdasarkan parameter saluran transmisi yang ditunjukkan pada data –data parameter dan tower yang digunakan sistem transmisi 275 kV di Sulbagsel.

Parameter Tower Transmisi

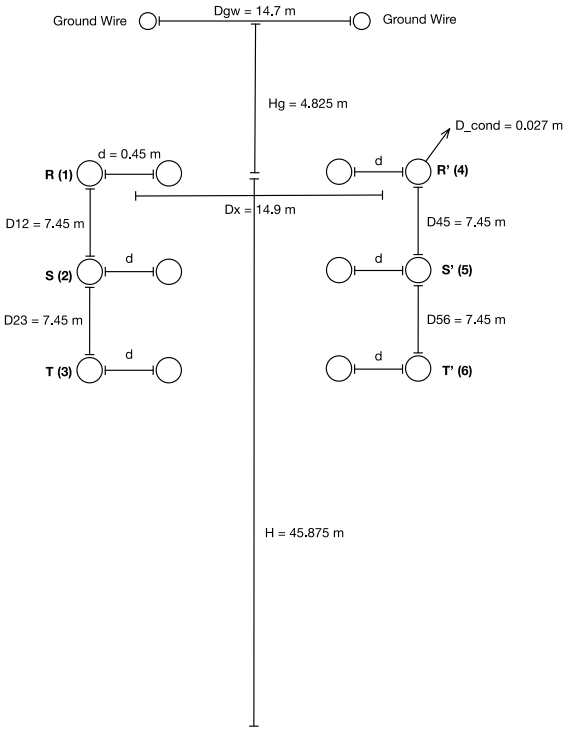
Berikut merupakan model konfigurasi tower yang digunakan untuk saluran transmisi 275 kV Latupa - Wotu - Pamona yang didapat dari data PT. Poso Energy melalui PT. PLN UIKL Sulawesi ditunjukkan pada Tabel 3. 2 dan Gambar 3. 8.

Tabel 3. 2 Parameter tower transmisi

Konduktor Phasa	
Parameter	Value
A	431 mm2
Strand	54 strands
Tipe	ACSR / AL
GMR	0,01093 meter
Xa	0,209 ohm per 1 km
Xa’	0,179 megaohms per 1 km
R-T1 (20)	0,075
R-T2 (75)	0,092
Frekuensi	50 Hz

Ground Wire	
Parameter	Value
A	313,7 kcmil
Strand	19 strands
Tipe	AL
GMR	0,00384 ft
Xa	0,5725 ohm per 1 mile
Xa’	0,1288 megaohms per 1 mile
R-T1 (20)	0,86618
R-T2 (75)	1,28

Konstruksi kabel yang digunakan pada sistem transmisi 275 kV milik PT. Poso Energy merupakan tower dengan konfigurasi *double circuit* dan *double conductor* yang ditunjukkan pada Gambar 3. 8.



Gambar 3. 8 Konstruksi tower 275 kV

3.3.1 Perhitungan Resistansi

Diberikan persamaan perhitungan resistansi terhadap temperatur operasi yang ditunjukkan Persamaan (3).

$$R_{5\,MW} = R_{T1(20^0)} + \frac{I_{5\,MW} \times \left(R_{T1(75^0)} - R_{T1(20^0)}\right)}{Ampacity} \qquad (3)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3) diperoleh perhitungan resistansi pada setiap circuit transmisi.

$$R_{5\,MW} = 0{,}072 + \frac{10{,}49 \times (0{,}092 - 0{,}075)}{806} \quad = 0{,}07222 \ \frac{\Omega}{km}$$

$$R_{33,71\ MW} = 0{,}072 + \frac{70{,}77 \times (0{,}092 - 0{,}075)}{806} = 0{,}07349\ \frac{\Omega}{km}$$
$$R_{3,57\ MW} = 0{,}072 + \frac{7.49 \times (0{,}092 - 0{,}075)}{806} = 0{,}07215\ \frac{\Omega}{km}$$

Karena saluran merupakan *double conductor* maka nilai resistansi saluran menjadi :

$$R_{5\ MW} = 0{,}07222 \times 0{,}5 = 0{,}03611\ \frac{\Omega}{km}$$
$$R_{33,71\ MW} = 0{,}07349 \times 0{,}5 = 0{,}03674\ \frac{\Omega}{km}$$
$$R_{3,57\ MW} = 0{,}07215 \times 0{,}5 = 0{,}036075\ \frac{\Omega}{km}$$

Berdasarkan hasil perhitungan resistansi dapat dilihat diatas terdapat perbedaan nilai resistansi pada setiap *circuit* karena adanya perbedaan pembebanan pada saluran tersebut. Sehingga hasil total perhitungan resistansi pada setiap saluran setelah dilakukan dengan total panjang saluran pada masing-masing *circuit* adalah :

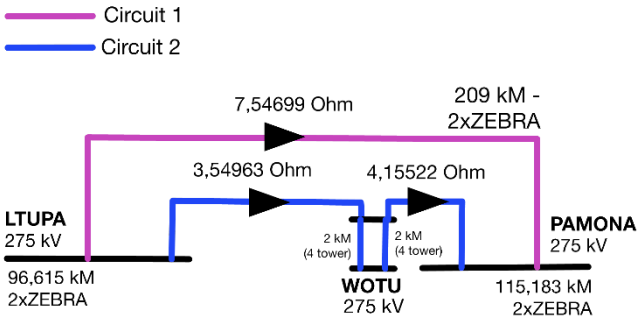
Circuit 1

$$R_{Latuppa-Pamona} = 0{,}03611 \times 209\ km = 7{,}54699\ \Omega$$

Circuit 2

$$R_{Latuppa-Wotu} = 0{,}03674 \times 96{,}615\ km = 3{,}54963\ \Omega$$
$$R_{Wotu-Pamona} = 0{,}036075 \times 115{,}183\ km = 4{,}15522\ \Omega$$
$$R_{Latuppa-Pamona} = 3{,}54963\ \Omega + 4{,}15522\ \Omega = 7{,}70485\ \Omega$$

Sehingga hasil perhitungan resistansi ditunjukkan melalui diagram pada Gambar 3. 9



Gambar 3. 9 Resistansi setiap saluran Latuppa-Wotu-Pamona Eksisting

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut terdapat perbedaan resistansi antara *circuit* 1 dan *circuit* 2 mencapai 0,15786 Ohm. Hal ini dapat memberikan pengaruh pada aliran daya antara *circuit* 1 dan *circuit* 2, karena arus akan cenderung melewati saluran dengan nilai impedansi yang lebih kecil sehingga terjadi ketidakseimbangan pembebanan pada setiap *circuit* seiring dengan bertambahnya beban di GI Wotu dan ini tentunya mempengaruhi nilai tegangan pada setiap titik gardu induk yang terhubung pada saluran.

3.3.2 Perhitungan Reaktansi (x)

Mengacu pada kontruksi dan konfigurasi tower pada gambar diatas maka dapat dilakukan perhitungan nilai reaktansi (X) pada setiap *phasa* pada keadaan *eksisting*, sehingga dapat dilihat ketidakseimbangan nilai reaktansi pada setiap *phasa* yang ditunjukkan melalui pendekatan perhitungan [10] melalui Persamaan (4)

Self Reactance

$$X_{AA} = \omega . 2 . 10^{-4} . \left(ln \left(\frac{2\left(H_A + \sqrt[2]{\frac{\rho}{j\omega\mu}}\right)}{GMR} \right) \right) \frac{ohm}{km} \qquad (4)$$

Mutual Reactance

$$X_{AB} = \omega . 2 . 10^{-4} . \left(ln \left(\frac{(H'_{AB} + 2\sqrt[2]{\frac{\rho}{j\omega\mu}})}{H_{AB}} \right) \right) . \left(\frac{I_B}{I_A} \right) ohm/km \qquad (5)$$

Dengan menggunakan Persamaan (4) dan Persamaan (5), maka dapat ditentukan nilai *self reactance* dan *mutual reactance* untuk saluran transmisi 275 kV pada analisis ini. Karena saluran transmisi terdiri atas *double conductor* maka diberikan nilai GMR yang baru dan dihitung dengan Persamaan (5) karena adanya efek *Bundled Conductor :*

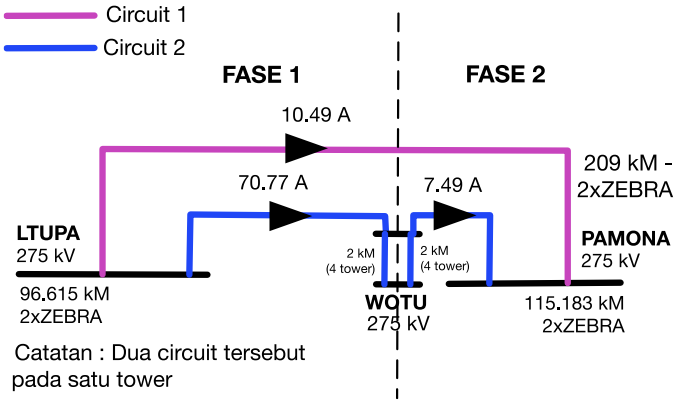
$$\boldsymbol{GMR_{update} = \sqrt{GMR \times d}} \qquad (6)$$

Maka dihasilkan nilai GMR update terbaru menjadi :

$$\boldsymbol{GMR_{update} = \sqrt{0,01093 \times 0,45} = 0,07013\ m}$$

Pada sistem Sulbagsel dengan konfigurasi *double circuit* dimana salah satu circuit dengan jarak tertentu terhubung ke suatu bus beban dan lanjut terhubung ke titik terakhir saluran transmisi sedangkan circuit yang lain langsung menuju ke titik akhir transmisi memberi pengaruh nilai reaktansi pada setiap phasa untuk masing – masing *circuit*. Khususnya, nilai *mutual reactance* yang dipengaruhi oleh nilai arus pada kedua saluran yang mengalami *mutual reacteance* yang dapat dilihat pada Persamaan (5). Nilai arus menjadi perlu dipertimbangkan karena nilai pembebanan pada masing – masing circuit mempunyai nilai arus yang berbeda.

Sehingga dapat diketahu dampak adanya fenomena diatas maka diberikan visualisasi permodelan dan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 3. 10



Gambar 3. 10 Arus Setiap Saluran Latuppa-Wotu-Pamona

Tabel 3. 3 Perbandingan *mutual reactance* Fase 1 dan Fase 2

FASE 1
$X_{AD} = 314,159.2.10^{-4}.\left(ln\left(\frac{\left(92,952+2\sqrt[2]{\frac{100}{314,159.4\pi.10^{-7}}}\right)}{14,9}\right)\right).\left(\frac{10,49}{70,77}\right)$ $X_{AD} = 0{,}040065\,\frac{\Omega}{km}$
FASE 2
$X_{AD} = 314,159.2.10^{-4}.\left(ln\left(\frac{\left(92,952+2\sqrt[2]{\frac{100}{314,159.4\pi.10^{-7}}}\right)}{14,9}\right)\right).\left(\frac{10,49}{7,49}\right)$ $X_{AD} = 0{,}37856\,\frac{\Omega}{km}$

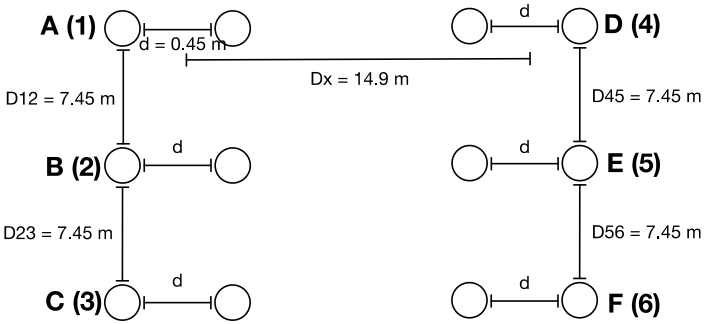
Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 3. 3 , maka dapat diketahui bahwa dengan adanya perbedaan nilai arus yang besar pada antar kedua

circuit memberikan ketimpangan nilai *mutual reactance* (x) yang besar juga dan tentunya akan berpengaruh pada akumulasi total nilai impedansi untuk setiap phasanya. Selanjutnya, diberikan nilai impedansi secara lengkap yang ditunjukkan pada matriks 6 x 6 [11] berdasarkan dengan konfigurasi konduktor ditunjukaan Matrik X seperti Persamaan (7).

$$X = \begin{bmatrix} X_{AA} & X_{AB} & X_{AC} & X_{AD} & X_{AE} & X_{AF} \\ X_{BA} & X_{BB} & X_{BC} & X_{BD} & X_{BE} & X_{BF} \\ X_{CA} & X_{CB} & X_{CC} & X_{CD} & X_{CE} & X_{CF} \\ X_{DA} & X_{DB} & X_{DC} & X_{DD} & X_{DE} & X_{DF} \\ X_{EA} & X_{EB} & X_{EC} & X_{ED} & X_{EE} & X_{EF} \\ X_{FA} & X_{FB} & X_{FC} & X_{FD} & X_{FE} & X_{FF} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dimana :

$$X_{AA} = X_{BB} = X_{CC} = X_{DD} = X_{EE} = X_{FF} : Self\ Reactance$$
$$X_{AB} = X_{AC} = X_{AD} = \cdots = X_{FD} = X_{FE} = X_{FF} : Mutual\ Reactance$$



Gambar 3. 11 Visualisasi konduktor Matriks

Perhitungan reaktansi mengacu pada data tower yang digunakan, yaitu tower dengan konfigurasi *double circuit* dan *double conductor* dimana memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 3. 11. Dengan menggunakan persamaan *self* dan *mutual reactance* perhitungan dilakukan menggunakan program Matlab maka diperoleh matriks (X).

$$X_{fase-1} = \begin{bmatrix} 0{,}6069 & 0{,}3133 & 0{,}2693 & 1{,}8233 & 1{,}7731 & 1{,}6707 \\ 0{,}3133 & 0{,}6060 & 0{,}3124 & 1{,}7731 & 1{,}8176 & 1{,}7674 \\ 0{,}2693 & 0{,}3124 & 0{,}6052 & 1{,}6707 & 1{,}7674 & 1{,}8118 \\ 0{,}0401 & 0{,}0390 & 0{,}0367 & 0{,}6069 & 0{,}3133 & 0{,}2693 \\ 0{,}0390 & 0{,}0399 & 0{,}0388 & 0{,}3133 & 0{,}6060 & 0{,}3124 \\ 0{,}0367 & 0{,}0388 & 0{,}0398 & 0{,}2693 & 0{,}3124 & 0{,}6052 \end{bmatrix} \frac{ohm}{km}$$

$$X_{fase-2} = \begin{bmatrix} 0{,}6069 & 0{,}3133 & 0{,}2693 & 0{,}1930 & 0{,}1877 & 0{,}1768 \\ 0{,}3133 & 0{,}6060 & 0{,}3124 & 0{,}1877 & 0{,}1924 & 0{,}1871 \\ 0{,}2693 & 0{,}3124 & 0{,}6052 & 0{,}1768 & 0{,}1871 & 0{,}1918 \\ 0{,}3785 & 0{,}3681 & 0{,}3468 & 0{,}6069 & 0{,}3133 & 0{,}2693 \\ 0{,}3681 & 0{,}3773 & 0{,}3669 & 0{,}3133 & 0{,}6060 & 0{,}3124 \\ 0{,}3468 & 0{,}3669 & 0{,}3761 & 0{,}2693 & 0{,}3124 & 0{,}6052 \end{bmatrix} \frac{ohm}{km}$$

Sesuai dengan kasus diatas yang terbagi menjadi Fase 1 dengan panjang 96,615 km dan Fase 2 dengan panjang 115,183 km maka diperoleh nilai total reaktansi (X) setelah dikalikan dengan nilai panjang pada setiap Fase.

$$X_{Total\ fase-1} = \begin{bmatrix} 58{,}6345 & 30{,}2707 & 26{,}0214 & 176{,}1555 & 171{,}3116 & 161{,}4117 \\ 30{,}2707 & 58{,}5516 & 30{,}1872 & 171{,}3116 & 175{,}6053 & 170{,}7595 \\ 26{,}0214 & 30{,}1872 & 58{,}4675 & 161{,}4117 & 170{,}7595 & 175{,}0518 \\ 3{,}8703 & 3{,}7639 & 3{,}5464 & 58{,}6345 & 30{,}2707 & 26{,}0214 \\ 3{,}7639 & 3{,}8582 & 3{,}7518 & 30{,}2707 & 58{,}5516 & 30{,}1872 \\ 3{,}5464 & 3{,}7518 & 3{,}8461 & 26{,}0214 & 30{,}1872 & 58{,}4675 \end{bmatrix} ohm$$

$$X_{Total\ fase-2} = \begin{bmatrix} 69{,}9032 & 36{,}0883 & 31{,}0223 & 22{,}2266 & 21{,}6154 & 20{,}3663 \\ 36{,}0883 & 69{,}8044 & 35{,}9888 & 21{,}6154 & 22{,}1572 & 21{,}5457 \\ 31{,}0223 & 35{,}9888 & 69{,}7041 & 20{,}3663 & 21{,}5457 & 22{,}0873 \\ 43{,}5973 & 42{,}3985 & 39{,}9483 & 69{,}9032 & 36{,}0883 & 31{,}0223 \\ 42{,}3985 & 43{,}4612 & 42{,}2619 & 36{,}0883 & 69{,}8044 & 35{,}9888 \\ 39{,}9483 & 42{,}2619 & 43{,}3242 & 31{,}0223 & 35{,}9888 & 69{,}7041 \end{bmatrix} ohm$$

Sehingga, total nilai reaktansi dengan menjumlahkan nilai $X_{Total\ fase\ -1}$ dengan $X_{Total\ fase\ -2}$ maka diperoleh nilai reaktansi (X) total yang ditunjukkan pada matriks $(X)_{Total}$.

$$X_{Total} = \begin{bmatrix} 128{,}537 & 66{,}3590 & 57{,}0437 & 198{,}382 & 192{,}927 & 181{,}778 \\ 66{,}3590 & 128{,}355 & 66{,}1760 & 192{,}927 & 197{,}762 & 192{,}305 \\ 57{,}0437 & 66{,}1760 & 128{,}171 & 181{,}778 & 192{,}305 & 197{,}139 \\ 47{,}4677 & 46{,}1624 & 43{,}4947 & 128{,}537 & 66{,}3590 & 57{,}0437 \\ 46{,}1624 & 47{,}3194 & 46{,}0136 & 66{,}3590 & 128{,}355 & 66{,}1760 \\ 43{,}4947 & 46{,}0136 & 47{,}1703 & 57{,}0437 & 66{,}1760 & 128{,}171 \end{bmatrix} ohm$$

Berdasarkan hasil diatas dapat dilihat bahwa pada bagian matriks yang warna biru, merupakan dampak dari adanya perbedaan nilai arus pada fase 1 dan fase 2 akibat terhubungnya satu circuit ke GI Wotu. Dengan perbedaan impedansi yang sangat besar menimbulkan ketidakseimbangan nilai tegangan semakin besar pula pada setiap phasanya. Hal ini dapat dilihat sebagai penyebab terjadinya ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada Sistem Transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa.

3.4. Pemodelan Konfigurasi Sistem

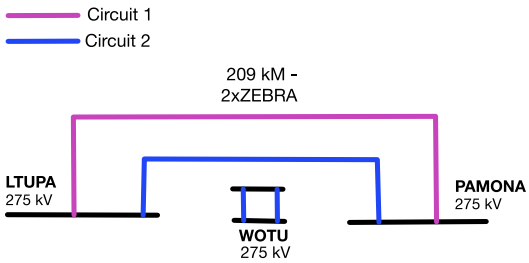
Setelah mengetahui penyebab fenomena unbalance yang diakibatkan oleh konfigurasi *eksisting* dimana dengan adanya satu circuit yang terhubung ke GI Wotu memberikan ketimpangan nilai matriks reaktansi (x) yang cukup besar sehingga menimbulkan ketidakseimbangan tegangan pada konfigurasi sistem *eksisting*.

Untuk memperoleh nilai impedansi yang seimbang agar nilai tegangan pada sistem menjadi seimbang, maka perlu adanya konfigurasi baru untuk sistem transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa. Pemodelan dilakukan agar dapat memberikan *case* konfigurasi yang dapat dilakukan pada sistem agar nilai ketidakseimbangan tegangan (LVUR) yang terjadi dapat diturunkan sesuai dengan standar NEMA. Dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 maka simulasi dilakukan melalui 2 *case* konfigurasi sistem yang diberikan, yaitu:

a. *Double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu
b. *Double circuit* terhubung ke GI Wotu

Pemodelan tersebut diperlukan untuk mengetahui konfigurasi sistem yang baru untuk mengurangi nilai persen ketidakseimbangan (LVUR) pada sistem *eksisting* tanpa dilakukan Transposisi. Rekonfigurasi ini juga diperlukan untuk mengetahui penyebab fenomena *unbalance* tegangan yang terjadi pada sistem kelistrikan Sulbagsel. Dengan melakukan pemodelan case konfigurasi tersebut, maka dapat dibandingkan nilai ketidakseimbangan tegangan dengan kondisi *eksisting*. Konfigurasi yang akan dilakukan pada sistem kelistrikan akan dibahas lebih lanjut.

3.4.1 *Double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu



Gambar 3. 12 Konfigurasi *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu

Konfigurasi sistem tanpa transposisi yang dilakukan adalah menghubungkan *double circuit* dari GI Latuppa-275 kV langsung menuju ke GI Pamona-275 kV sepanjang 209 km tanpa terhubung ke GI Wotu-275 kV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 12. Simulasi dilakukan dalam 2 kondisi, yaitu kondisi sistem saat *no-load* dan kondisi sistem terbebani (*on- load*).

Simulasi Untransposed *Double circuit* Tanpa Terhubung ke GI Wotu dan Tanpa Beban (no load)

Pada simulasi tanpa beban (no-load) yang dilakukan pada ETAP 12.6.0 dapat ditunjukkan pada Gambar Lampiran 3. 1. Hasil simulasi unbalance loadflow pada sistem Sulbagsel dengan *case untransposed double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu dan tanpa beban (*no load)* dapat dirangkum dengan menunjukkan nilai persen ketidakseimbangan tegangan pada Tabel 3. 4

Tabel 3. 4 LVUR *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu – no load

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LVUR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	311,0	312,3	316,9	313,4	316,90	1,12
	150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pamona	275	303,4	304,1	309,1	305,53	309,10	1,17
	150	159,50	160,10	162,10	160,57	162,10	0,95
	20	20,55	20,36	20,61	20,51	20,61	0,50
Poso	150	159,40	160,10	162,10	160,53	162,10	0,98
	20	19,00	18,74	18,93	18,89	19,00	0,58
Pasang Kayu	150	145,90	145,00	147,80	146,23	147,80	1,07
	20	18,59	18,32	18,49	18,47	18,59	0,65
Silae	150	147,3	146,6	149,3	147,73	149,30	1,06
	20	18,84	18,58	18,76	18,72	18,84	0,60
Sidera	150	148,10	147,50	150,20	148,60	150,20	1,08
	66	66,81	66,55	67,63	66,99	67,63	0,94
	20	19,13	18,86	19,06	19,02	19,13	0,59
Talise	66	65,52	65,15	66,27	65,65	66,27	0,95
	20	19,11	18,86	19,02	18,99	19,11	0,60

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LVUR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Parigi	66	64,73	64,29	65,44	64,82	65,44	0,96
	20	19,12	18,84	19,01	18,99	19,12	0,67

Berdasarkan data pada Tabel 3. 4 bahwa nilai persen ketidakseimbangan sudah melewati batas aman yakni kurang dari 1 % . Namun pada beberapa GI masih memiliki nilai LVUR lebih tinggi dari ambang batas 1%, seperti pada GI Latuppa-275, GI Pamona-275, GI Pasang Kayu-150, GI Silae-150 dan GI Sidera-150, Dengan tingginya nilai LVUR pada sistem, maka berpotensi menyebabkan beroperasinya relay proteksi khususnya pada kondisi awal *energized.*

Simulasi Untransposed Double circuit Tanpa Terhubung ke GI Wotu dengan Beban (20 MVA*)*

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk *untransposed double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu dengan beban (20 MVA). Data hasil simulasi pada saluran transmisi 275 kV Latuppa – Pamona untuk kondisi dengan saluran diberikan beban 20 MVA yang dapat dilihat pada Gambar Lampiran 3. 2. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, didapatkan nilai persen ketidakseimbangan tegangan yang dapat ditunjukkan pada tabel 3.5

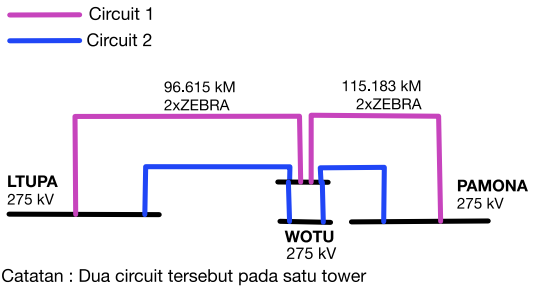
Tabel 3. 5 LVUR *double circuit* tanpa terhubung ke GI Wotu – on load

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	298,7	302,6	299,7	302,6	297,8	0,97
	150	162,0	164,0	162,5	164,0	161,5	0,92
Pamona	275	292,0	293,1	296,8	294,0	296,8	0,96
	150	152,2	152,8	154,4	153,1	154,4	0,83
	20	19,3	19,3	19,6	19,4	19,6	0,79

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Poso	150	152,1	152,7	154,4	153,1	154,4	0,87
	20	19,5	19,3	19,6	19,5	19,6	0,45
Pasang Kayu	150	136,6	135,6	138,2	136,8	138,2	1,02
	20	17,2	17,0	17,1	17,1	17,2	0,69
Silae	150	138,2	137,4	140,0	138,5	140,0	1,06
	20	17,5	17,3	17,4	17,4	17,5	0,63
Sidera	150	139,1	138,4	140,9	139,5	140,9	1,03
	66	62,5	62,2	63,2	62,6	63,2	0,91
	20	17,9	17,6	17,8	17,7	17,9	0,62
Talise	66	61,1	60,7	61,7	61,1	61,7	0,94
	20	17,6	17,4	17,6	17,5	17,6	0,48
Parigi	66	60,2	59,7	60,8	60,2	60,8	0,96
	20	17,7	17,4	17,6	17,5	17,7	0,72

Dapat dilihat pada Tabel 3. 5 setelah dilakukan pembebanan pada saluran transmisi 275 kV maka LVUR mengalami penurunan khususnya pada sisi tegangan 275 kV dan 150 kV di sekitar GI yang terhubung secara langsung dengan GI Latuppa ataupun GI Pamona. Penurunan tegangan terjadi karena adanya pembebanan pada saluran transmisi 275 kV, sehingga dampak *line charging* dapat ditekan oleh adanya efek reaktansi yang mulai muncul akibat adanya arus yang mengalir pada saluran transmisi. Pada GI Pasang Kayu, Silae dan Sidera mempunyai nilai persen ketidakseimbangan > dari 1 %. Hal ini terjadi karena terdapat saluran transmisi 150 kV yang menghubungkan GI Poso dan GI Sidera memiliki jarak panjang mencapai 141,5 km sehingga perlu dilakukan kajian lebih detail terkait fenomena tersebut.

3.4.2 *Double circuit* terhubung ke GI Wotu



Gambar 3. 13 Konfigurasi *double circuit* terhubung ke Wotu

Konfigurasi sistem tanpa transposisi selanjutnya yang dilakukan adalah menghubungkan *double circuit* dari GI Latuppa-275 kV menuju ke GI Wotu-275 kV sepanjang 96.615 km dan dilanjutkan menuju ke GI Pamona-275 kV dengan panjang 115.183 km yang dapat dimodelkan sesuai dengan Gambar 3. 13 . Simulasi juga dilakukan dalam 2 kondisi, yaitu kondisi sistem saat *no-load* dan kondisi sistem terbebani (*on- load*).

Simulasi Untransposed Double circuit Terhubung ke GI Wotu dan Tanpa Beban (no load)

Berikut merupakan hasil simulasi pada saluran transmisi 275 kV Latuppa – Pamona untuk kondisi dengan saluran tanpa diberikan beban yang dapat dilihat pada Gambar Lampiran 3. 3. Berdasarkan hasil simulasi *untransposed double circuit* terhubung ke GI Wotu dan tanpa beban, maka nilai persen ketidakseimbangan tegangan dengan konfigurasi tersebut dapat ditunjukkan pada Tabel 3. 6

Tabel 3. 6 LVUR *double circuit* terhubung ke GI Wotu – no load

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	306,1	307,1	311,5	308,2	311,5	1,06

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
	150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Wotu	275	304,5	305,5	309,9	306,6	309,9	1,07
	150	159,5	157,6	159,8	159,0	159,8	0,52
	20	20,3	20,1	20,1	20,1	20,3	0,60
Pamona	275	299,4	300,4	304,6	301,5	304,6	1,04
	150	165,6	166,2	168,2	166,7	168,2	0,92
	20	21,4	21,2	21,5	21,4	21,5	0,46
Poso	150	165,5	166,2	168,1	166,6	168,1	0,90
	20	21,4	21,2	21,5	21,4	21,5	0,46
Pasang Kayu	150	153,4	152,5	155,2	153,7	155,2	0,98
	20	19,6	19,4	19,6	19,5	19,6	0,58
Silae	150	154,7	154,0	156,6	155,1	156,6	0,97
	20	19,9	19,6	19,8	19,8	19,9	0,54
Sidera	150	155,4	154,8	157,4	155,9	157,4	0,98
	66	70,3	70,0	71,1	70,4	71,1	0,87
	20	20,1	19,9	20,1	20,0	20,1	0,54
Talise	66	69,1	68,7	69,8	69,2	69,8	0,87
	20	20,2	20,0	20,1	20,1	20,2	0,53
Parigi	66	68,3	67,9	69,0	68,4	69,0	0,88
	20	20,2	20,0	20,1	20,1	20,2	0,60

Setelah *double circuit* pada saluran transmisi 275 kV terhubung ke GI Wotu maka dihasilkan penurunan LVUR yang signifikan pada sistem transmisi. Pada kondisi GI Latuppa tanpa beban sedangkan di GI Wotu sudah diberikan beban maka dihasilkan ketidakseimbangan pada GI Latuppa, Wotu dan Pamona yang masih mendekati nilai 1 % . Dengan

terhubungnya *double circuit* ke GI Wotu membagi jarak saluran transmisi 275 kV yang awalnya mencapai 211 kM menjadi 96.615 km dan 115.183 km, sehingga dapat menurunkan LVUR mengingat jarak menjadi lebih pendek sehingga menurunkan nilai ketimpangan impedansi pada saluran transmisi 275 kV tersebut.

Simulasi Untransposed Double circuit Terhubung ke GI Wotu dengan Beban (20 MVA)

Berikut merupakan hasil simulasi pada saluran transmisi 275 kV Latuppa – Pamona untuk kondisi dengan saluran diberikan beban mencapai 20 MVA yang dapat dilihat pada Gambar Lampiran 3. 4. Berdasarkan hasil simulasi *untransposed double circuit* terhubung ke GI Wotu dengan beban (20 MVA) dapat menghasilkan nilai persen ketidakseimbangan tegangan yang disajikan pada Tabel 3. 7.

Tabel 3. 7 LVUR *double circuit* terhubung ke GI Wotu – on load

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	280,60	281,20	284,70	282,17	284,70	0,90
	150	151,60	151,90	153,70	152,40	153,70	0,85
Wotu	275	280,30	281,00	284,40	281,90	284,40	0,89
	150	144,80	143,40	145,10	144,43	145,10	0,46
	20	18,18	18,03	18,04	18,08	18,18	0,51
Pamona	275	277,20	278,10	281,20	278,83	281,20	0,85
	150	150,50	151,10	152,60	151,40	152,60	0,79
	20	19,25	19,12	19,30	19,22	19,30	0,41
Poso	150	150,5	151,5	152,5	151,5	152,50	0,66
	20	19,25	19,12	19,30	19,22	19,30	0,41
Pasang Kayu	150	134,4	133,4	135,9	134,6	135,90	0,99
	20	16,91	16,68	16,81	16,80	16,91	0,67

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Silae	150	136,1	135,3	137,7	136,4	137,70	0,98
	20	17,21	16,98	17,13	17,10	17,21	0,61
Sidera	150	137,1	136,3	138,7	137,4	138,70	0,97
	66	61,46	61,18	62,12	61,59	62,12	0,86
	20	17,55	17,31	17,47	17,44	17,55	0,59
Talise	66	60,01	59,61	60,62	60,08	60,62	0,90
	20	17,31	17,09	17,22	17,21	17,31	0,62
Parigi	66	59,13	58,66	59,71	59,16	59,71	0,92
	20	17,33	17,08	17,21	17,20	17,33	0,71

Dengan terhubungnya saluran transmisi 275 kV terhubung ke GI Wotu dengan GI Latuppa dan Wotu dalam keadaan berbeban maka dihasilkan penurunan nilai ketidakseimbangan tegangan yang cukup signifikan. Dapat dilihat pada tabel diatas, nilai persen ketidakseimbangan sudah dibawah ambang batas 1 %. Namun, perlu diketahui bahwa nilai dibawah ambang batas masih perlu adanya analisis lebih lanjut. Hal ini dikarenakan, meski nilai LVUR dibawah 1%, namun nilai *Voltage Drop* yang diperbolehkan oleh PT. PLN yaitu sebesar +5% dan -10% hampir terlampaui pada beberapa GI.

3.4.3 Perbandingan Nilai Persen Ketidakseimbangan

Berdasarkan hasil simulasi konfigurasi sistem yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dilakukan perbandingan nilai ketidakseimbangan tegangan (LVUR) antar konfigurasi sistem dengan konfigurasi sistem *eksisting* seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3. 8

Tabel 3. 8 Perbandingan LVUR antar konfigurasi

GARDU INDUK	KV BASE	*Eksisting*	CASE A	CASE B
		LVUR	LVUR	LVUR
	(kV)	(%)	(%)	(%)
Silae	150	1,97	1,06	0,98
	20	1,92	0,60	0,61
Pasang Kayu	150	1,94	1,07	0,99
	20	1,88	0,65	0,67
Parigi	66	2,28	0,96	0,92
	20	2,11	0,67	0,71
Talise	150	2,02	0,95	0,90
	20	1,86	0,60	0,62
Poso	150	1,46	0,98	0,66
	20	1,45	0,58	0,41
Pamona	275	1,47	0,96	0,85
	150	1,78	0,83	0,79
	20	1,61	0,50	0,41
Sidera	150	1,92	1,08	0,97
	66	1,83	0,94	0,86
	20	1,88	0,59	0,59

Hasil diatas merupakan perbandingan nilai persen ketidakseimbangan dengan :
Case A : Hasil simulasi *double circuit* tanpa ada *circuit* yang terhubung menuju ke GI Wotu terlebih dahulu (*Eksisting*)
Case B : Hasil simulasi dengan *double circuit* yang terhubung ke GI Wotu terlebih dahulu

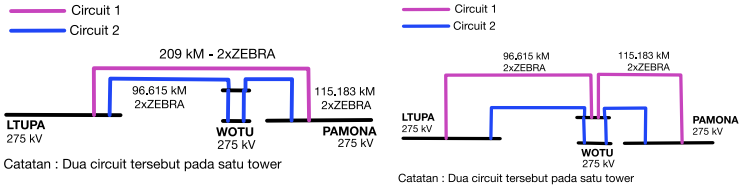
Ketidakseimbangan tegangan pada sistem *eksisting* terjadi karena adanya perbedaan pembebanan antar circuit dimana salah satu

circuit terhubung ke GI Wotu sehingga terjadi perbedaan pembebanan. Case A dan Case B memodelkan bagaimana pengaruh konfigurasi baru terhadap pembebanan setiap circuit yang ada. Dapat dilihat pada Tabel 3. 8, bahwa dengan menghubungkan *double circuit* menuju ke satu tujuan GI dapat mengurangi LVUR pada sistem. Hal ini karena dengan menggunakan konfigurasi *double circuit* maka circuit akan terbebani dengan nilai yang sama. Pada Case A dimana konfigurasi menghubungkan *double circuit* dari GI Latuppa menuju ke GI Pamona dapat menurunkan nilai LVUR pada sistem Sulbagsel meskipun masih terdapat beberapa GI yang masih memiliki nilai LVUR melebihi ambang batas. Begitu juga dengan Case B dengan konfigurasi yang menghubungkan *double circuit* menuju ke GI Wotu dapat mengurangi nilai LVUR seperti yang ditampilkan Tabel 3. 8. Hal ini semakin menguatkan analisis bahwa konfigurasi sistem Sulbagsel *eksisting* perlu dilakukan perubahan konfigurasi atau rekonfigurasi agar ketidakseimbangan tegangan yang terjadi bisa diatasi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Konfigurasi Sistem Baru



Gambar 4. 1 Perbandingan konfigurasi *eksisting* dan konfigurasi baru

Demi tercapainya nilai LVUR yang semakin baik, maka diperlukan adanya konfigurasi sistem yang baru untuk mendukung penggunaan Transposisi yang akan diterapkan. Sistem *eksisting* yang ada memiliki nilai LVUR yang jauh dari batas standar yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, dengan melakukan perubahan konfigurasi sistem transmisi yang baru diharapkan dapat mengurangi nilai LVUR. Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil simulasi transposisi dengan menggunakan sistem yang baru yang dapat dilihat pada Gambar 4. 1.

Konfigurasi sistem yang baru ini mengubah 1 circuit 209 km dimana pada kondisi *eksisting* terhubung langsung dari GI Latuppa menuju GI Pamona menjadi 1 circuit 96.615 km yang terhubung menuju ke GI Wotu dan selanjutnya menuju ke GI Pamona dengan 1 circuit 115.183 km. Pemilihan konfigurasi baru ini mengacu pada hasil persen ketidakseimbangan tegangan yang ditunjukkan pada sub-bab 3.4 dimana konfigurasi tersebut memiliki nilai persen ketidakseimbangan yang cukup rendah namun dengan catatan masih terdapat beberapa GI yang mengalami nilai LVUR mendekati ambang batas. Sehingga apabila sistem dengan konfigurasi yang baru ditambah dengan transposisi diharapkan dapat memberikan nilai ketidakseimbangan tegangan (LVUR) yang semakin baik.

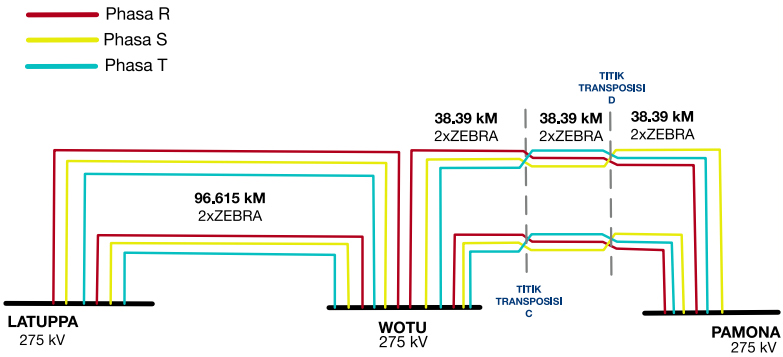
4.2. Konfigurasi Sistem Baru dengan Transposisi

Transposisi dapat dilakukan dengan mengubah posisi setiap phasa konduktor dengan jarak yang sama. Titik transposisi yang umum digunakan adalah 1/3-1/3-1/3 panjang saluran dan 1/6-1/3-1/3-1/6 panjang saluran [13]. Pada simulasi kali ini akan digunakan metode 1/3-1/3-1/3 dari panjang saluran. Metode ini dipilih karena memerlukan tower yang lebih sedikit sehingga akan lebih menguntungkan apabila direalisasikan pada sistem transmisi. Transposisi memungkinkan menghasilkan nilai ketidakseimbangan tegangan atau LVUR yang serendah mungkin pada sistem. Berikut ini diberikan *case* mengenai konfigurasi transposisi yang dapat dilakukan, yaitu:

- Transposisi pada saluran transmisi dari GI Pamona – GI Wotu (jarak 115.183 kM)
- Transposisi pada saluran transmisi dari GI Latuppa – GI Wotu (jarak 96.615 kM)
- Transposisi pada saluran transmisi dari GI Pamona – GI Wotu dan GI Latuppa – GI Wotu

Detail simulasi dan analisis transposisi pada sistem konfigurasi baru akan dilakukan pada kondisi berbeban pada setiap GI Latuppa, Wotu dan Pamona yang dapat dilihat pada sub-bab berikut.

4.2.1 Konfigurasi Transposisi 1



Gambar 4. 2 Konfigurasi Transposisi 1

Pada konfigurasi 1 seperti ditunjukan pada Gambar 4.2, dilakukan transposisi pada saluran transmisi yang menghubungkan GI Wotu dan GI Pamona dengan jarak 115.183 km. Transposisi pada konfigurasi ini sangat disarankan karena memenuhi syarat untuk dilakukan transposisi yaitu panjang saluran lebih dari 100 km. Simulasi mengenai transposisi pada saluran transmisi yang menghubungkan GI Wotu dan GI Pamona, ditunjukkan pada pemodelan saluran 275 kV yang menghubungkan Latuppa – Wotu- Pamona sesuai dengan konfigurasi 1 dapat dilihat pada Gambar 4. 2 Berdasarkan hasil simulasi *unbalance loadflow* pada sistem dengan case konfigurasi transposisi 1dapat diketahui nilai persen ketidak seimbangan tegangan pada Tabel 4. 1

Tabel 4. 1 LVUR konfigurasi Transposisi 1

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	281,1	281,7	283,5	282,1	283,5	0,50
	150	151,8	152,2	153,1	152,4	153,1	0,48
Wotu	275	280,3	281,0	284,4	281,9	284,4	0,89
	150	144,8	143,4	145,1	144,4	145,1	0,46
	20	18,2	18,0	18,0	18,1	18,2	0,51
Pamona	275	277,8	278,5	279,8	278,7	279,8	0,39
	150	150,7	151,3	151,9	151,3	151,9	0,40
	20	19,2	19,2	19,3	19,2	19,3	0,27
Poso	150	150,7	151,2	151,8	151,2	151,8	0,37
	20	19,2	19,2	19,3	19,2	19,3	0,27
Pasang Kayu	150	134,3	133,4	135,4	134,4	135,4	0,77
	20	16,9	16,7	16,8	16,8	16,9	0,54

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Silae	150	136,1	135,3	137,2	136,2	137,2	0,73
	20	17,2	17,0	17,1	17,1	17,2	0,48
Sidera	150	137,1	136,4	138,2	137,2	138,2	0,70
	66	61,5	61,2	61,9	61,5	61,9	0,61
	20	17,3	17,1	17,2	17,2	17,3	0,50
Talise	66	60,0	59,6	60,4	60,0	60,4	0,66
	20	17,3	17,1	17,2	17,2	17,3	0,50
Parigi	66	59,1	58,7	59,5	59,1	59,5	0,69
	20	17,3	17,1	17,2	17,2	17,3	0,58

Berdasarkan hasil simulasi konfigurasi transposisi 1 pada saluran GI Pamona menuju ke GI Wotu, menghasilkan LVUR yang semakin turun apabila dibandingkan dengan saluran transmisi pada konfigurasi *eksisting*. Akan tetapi dapat dilihat bahwa masih terjadi kondisi *unbalance* meskipun masih dibawah ambang standar akibat dari saluran yang menghubungkan GI Latuppa – GI Wotu yang belum dilakukan transposisi.

Dengan adanya konfigurasi tranposisi 1 maka dapat menghasilkan nilai impedansi saluran transmisi dari GI Pamona – GI Wotu yang cukup seimbang yang dapat dilihat pada tabel matriks (X) dan (Y) dibawah ini. Sedangkan untuk Matriks (R) tidak ditampilkan karena sudah seimbang pada kondisi *eksisting.*

Tabel 4. 2 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 1 – Transposisi Jalur Wotu- Pamona

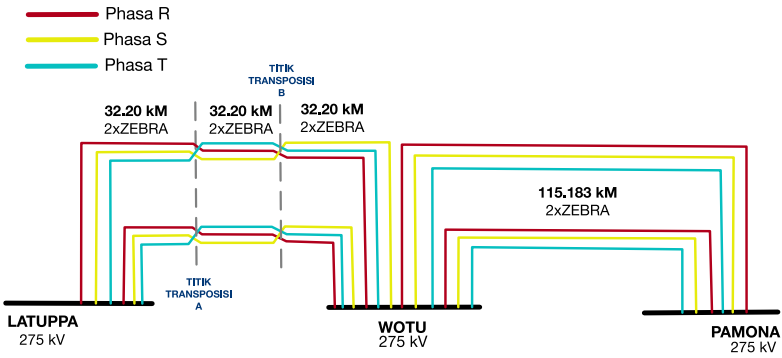
GI LATUPPA – GI WOTU				GI WOTU – GI PAMONA			
EKSISTING				TRANSPOSED			
(ohm.km)	R	S	T	(ohm.km)	R	S	T
R	30,41	18,24	17,97	R	37,88	21,66	21,66
S	18,24	34,37	18,30	S	21,66	37,88	39,58
T	17,97	18,30	30,55	T	21,66	21,66	37,88

Tabel 4. 3 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 1 – Transposisi Jalur Wotu- Pamona

GI LATUPPA – GI WOTU				GI WOTU – GI PAMONA			
EKSISTING				TRANSPOSED			
(usm. km)	R	S	T	(usm. km)	R	S	T
R	638,47	-166,30	-205,23	R	715,38	-213,94	-213,94
S	-166,30	527,73	-166,83	S	-213,94	715,38	-360,90
T	-205,23	-166,83	633,99	T	-213,94	-213,94	715,38

Dengan cukup seimbangnya nilai impedansi dan admitansi yang ada pada konfigurasi ini, akan berkontribusi dengan turunnya ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada saluran transmisi.

4.2.2 Konfigurasi Transposisi 2



Gambar 4. 3 Konfigurasi transposisi 2

Pada *case* konfigurasi transposisi kedua, dilakukan transposisi pada saluran transmisi yang menghubungkan GI Wotu dan GI Latuppa dengan jarak 96.615 km. Transposisi pada saluran ini membagi menjadi 3 panjang saluran dengan panjang masing-masing *segment* 32.20 km. Transposisi pada saluran transmisi yang menghubungkan GI Wotu dan GI Latuppa ditunjukkan pada pemodelan saluran 275 kV yang menghubungkan Latuppa – Wotu- Pamona yang dapat ditunjukkan pada pemodelan Gambar 4. 3. Berdasarkan konfigurasi tersebut dilakukan simulasi setelah dilakukan transposisi yang dapat dilihat pada Gambar 4. **3**. Berdasarkan hasil simulasi *unbalance loadflow* pada sistem dengan case konfigurasi transposisi kedua dapat diketahui nilai persen ketidak seimbangan tegangan pada Tabel 4. 4.

Tabel 4. 4 LVUR konfigurasi transposisi 2

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LVUR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Latuppa	275	281,2	281,7	283,3	282,1	283,3	0,44
	150	151,9	152,2	153,0	152,4	153,0	0,42

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LVUR
		R-S	S-T	T-R			
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(%)
Wotu	275	280,9	281,4	283,0	281,8	283,0	0,44
	150	144,5	143,8	144,7	144,3	144,7	0,25
	20	18,1	18,0	18,1	18,1	18,1	0,25
Pamona	275	277,6	278,4	280,1	278,7	280,1	0,50
	150	150,7	151,2	152,0	151,3	152,0	0,46
	20	19,2	19,1	19,3	19,2	19,3	0,30
Poso	150	150,7	151,2	152,0	151,3	152,0	0,46
	20	19,2	19,1	19,3	19,2	19,3	0,30
Pasang Kayu	150	134,3	133,4	135,5	134,4	135,5	0,82
	20	16,9	16,7	16,8	16,8	16,9	0,57
Silae	150	136,1	135,3	137,2	136,2	137,2	0,73
	20	17,2	17,0	17,1	17,1	17,2	0,51
Sidera	150	137,0	136,4	138,2	137,2	138,2	0,73
	66	61,4	61,2	61,9	61,5	61,9	0,66
	20	17,5	17,3	17,4	17,4	17,5	0,49
Talise	66	60,0	59,6	60,4	60,0	60,4	0,71
	20	17,3	17,1	17,2	17,2	17,3	0,52
Parigi	66	59,1	58,7	59,5	59,1	59,5	0,74
	20	17,3	17,1	17,2	17,2	17,3	0,61

Berdasarkan hasil simulasi untuk transposisi dengan konfigurasi transposisi 2 menghasilkan LVUR yang semakin menjauhi ambang batas 1% apabila dibandingkan dengan saluran transmisi *eksisting*. Namun tetap perlu diketahui bahwa masih tetap terjadi kondisi *unbalance* meskipun dibawah standar akibat dari saluran yang menghubungkan GI Pamona – GI Wotu dalam kondisi *eksisting*. Dengan adanya tranposisi pada segmen circuit ini maka nilai impedansi saluran transmisi dari GI

Latuppa – GI Wotu sudah seimbang yang dapat dilihat pada tabel matriks (X) dan (Y). Matriks (R) tidak ditampilkan karena sudah seimbang meski dalam kondisi *eksisting.*

Tabel 4. 5 Perbandingan Impedansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan Konfigurasi 2 – Transposisi Jalur Latuppa- Wotu

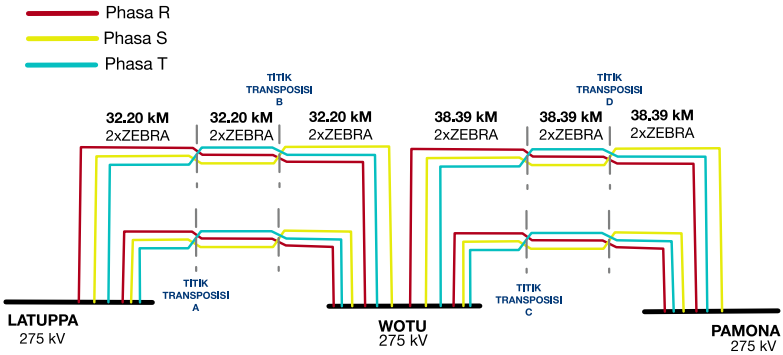
GI WOTU – GI PAMONA				GI LATUPPA – GI WOTU			
UNTRANSPOSED				TRANSPOSED			
(ohm.km)	R	S	T	(ohm.km)	R	S	T
R	36,25	21,74	21,42	R	31,77	18,17	18,17
S	21,74	40,97	21,82	S	18,17	31,77	18,17
T	21,42	21,82	36,41	T	18,17	18,17	31,77

Tabel 4. 6 Perbandingan Admintansi Per Phasa Per 1 km dengan menggunakan konfigurasi 2 – Transposisi Jalur Latuppa- Wotu

GI WOTU – GI PAMONA				GI LATUPPA – GI WOTU			
UNTRANSPOSED				TRANSPOSED			
(usm. km)	R	S	T	(usm .km)	R	S	T
R	761,17	-198,26	-244,66	R	600,06	-179,45	-179,45
S	-198,26	629,15	-198,89	S	-179,45	600,06	-179,45
T	-244,66	-198,89	755,82	T	-179,45	-179,45	600,06

Dapat dilihat pada Tabel 4. 5 dan Tabel 4. 6, nilai impedansi pada saluran setelah dilakukan konfigurasi transposisi kedua semakin baik dan seimbang. Dengan seimbangnya nilai impedansi dan admitansi pada saluran dapat berkontribusi untuk tercapainya keseimbangan tegangan seimbangan pada saluran transmisi

4.2.3 Konfigurasi Transposisi 3



Gambar 4. 4 Konfigurasi transposisi 3

Pada konfigurasi transposisi ketiga, dilakukan transposisi pada 2 saluran transmisi *double circuit* yang menghubungkan GI Wotu dan GI Pamona dengan jarak 115.183 km dan *double circuit* dari GI Wotu ke GI Latuppa dengan jarak 96.615 km. Pemodelan simulasi transposisi pada konfigurasi ketiga dapat ditunjukkan pada Gambar 4. 4. Dengan menggunakan konfigurasi tersebut, maka dilakukan simulasi *unbalance loadflow* pada sistem sesuai dengan Gambar 4. 4. Dari hasil simulasi tersebut maka dapat diketahui nilai LVUR yang disajikan pada Tabel 4. 7

Tabel 4. 7 LVUR konfigurasi transposisi 3

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	kV	kV	kV	kV	kV	kV	%
Latuppa	275	281,7	282,2	282,1	282,0	282,2	0,07
	150	152,2	152,4	152,4	152,3	152,4	0,04
Wotu	275	281,4	281,9	281,8	281,7	281,9	0,07
	150	144,2	144,3	144,4	144,3	144,4	0,07
	20	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	0,04

GARDU INDUK	KV BASE	PHASA			kV Avg	kV max	LV UR
		R-S	S-T	T-R			
	kV	kV	kV	kV	kV	kV	%
Pamona	275	278,3	278,8	278,7	278,6	278,8	0,07
	150	150,9	151,4	151,4	151,2	151,4	0,11
	20	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	0,15
Poso	150	150,9	151,4	151,3	151,2	151,4	0,13
	20	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	0,15
Pasang Kayu	150	134,4	133,5	135,0	134,3	135,0	0,52
	20	16,8	16,7	16,8	16,8	16,8	0,44
Silae	150	136,1	135,4	136,8	136,1	136,8	0,51
	20	17,1	17,0	17,1	17,1	17,1	0,38
Sidera	150	137,1	136,5	137,8	137,1	137,8	0,49
	66	61,5	61,2	61,7	61,5	61,7	0,40
	20	17,5	17,3	17,4	17,4	17,5	0,35
Talise	66	60,0	59,7	60,2	60,0	60,2	0,47
	20	17,2	17,1	17,2	17,2	17,2	0,40
Parigi	66	59,1	58,7	59,3	59,0	59,3	0,51
	20	17,2	17,1	17,2	17,2	17,2	0,49

Berdasarkan hasil simulasi untuk Transposisi Pada Saluran Transmisi Dari GI Pamona – GI Wotu – GI Latuppa memiliki LVUR yang semakin rendah apabila dibandingkan dengan saluran transmisi *eksisting* maupun dengan 2 konfigurasi yang ditampilkan sebelumnya. Dengan adanya transposisi maka nilai impedansi saluran transmisi dari GI Pamona – GI Wotu – GI Latuppa sudah seimbang yang dapat dilihat pada tabel matriks (X) dan (Y). Sedangkan matriks (R) tidak ditampilkan karena sudah seimbang meski dalam konfigurasi *eksisting.*

Tabel 4. 8 Perbandingan Resistansi Per Phasa Per 1 km hasil simulasi Rekomendasi 3 – Transposisi Latuppa-Wotu dan Wotu-Pamona

GI LATUPPA – GI WOTU TRANSPOSED				GI WOTU – GI PAMONA TRANSPOSED			
(ohm.km)	R	S	T	(ohm.km)	R	S	T
R	31,77	18,17	18,17	R	37,88	21,66	21,66
S	18,17	31,77	18,17	S	21,66	37,88	39,58
T	18,17	18,17	31,77	T	21,66	21,66	37,88

Tabel 4. 9 Perbandingan Admitansi Per Phasa Per 1 km hasil simulasi konfigurasi 3 – Transposisi Latuppa-Wotu dan Wotu-Pamona

GI LATUPPA – GI WOTU TRANSPOSED				GI WOTU – GI PAMONA TRANSPOSED			
usm. km	R	S	T	usm. km	R	S	T
R	600,06	-179,45	-179,45	R	715,38	-213,94	-213,94
S	-179,45	600,06	-179,45	S	-213,94	715,38	-360,90
T	-179,45	-179,45	600,06	T	-213,94	-213,94	715,38

Pada sistem dengan konfigurasi transposisi ketiga dapat menghasilkan nilai matriks impedansi dan admitansi yang seimbang untuk setiap fasa pada saluran transmisi. Dengan semakin seimbangnya impedansi, maka konfigurasi transposisi dapat berkontribusi untuk menyeimbangan nilai tegangan setiap fasa pada sistem transmisi.

4.3. Analisis Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi dan konfigurasi transposisi pada sistem transmisi 275 kV Sulbagsel yang telah dipaparkan pada sub-bab sebelumnya, maka dapat diberikan perbandingan LVUR untuk setiap konfigurasi yang ada terhadap nilai LVUR pada sistem *eksisting* yang ditunjukkan pada **Tabel 4. 10** Perbandingan LVUR antar konfigurasi transposisi

Tabel 4. 10 Perbandingan LVUR antar konfigurasi transposisi

GARDU INDUK	KV BASE	*EKSISTING*	2 CIRCUIT TERHU BUNG KE WOTU	KONFI GURASI TRANS POSISI 1	KONFI GURASI TRANS POSISI 2	KONFI GURASI TRANS POSISI 3
	(kV)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Latuppa	275	DATA TAK TERSEDIA	0,90	0,50	0,44	0,07
	150	DATA TAK TERSEDIA	0,85	0,48	0,42	0,04
Wotu	275	DATA TAK TERSEDIA	0,89	0,89	0,44	0,07
	150	DATA TAK TERSEDIA	0,46	0,46	0,25	0,07
	20	DATA TAK TERSEDIA	0,51	0,51	0,25	0,04
Pamona	275	1,47	0,85	0,39	0,50	0,07
	150	1,78	0,79	0,40	0,46	0,11
	20	1,61	0,41	0,27	0,30	0,15
Poso	150	1,46	0,66	0,37	0,46	0,13
	20	1,45	0,41	0,27	0,30	0,15
Pasang Kayu	150	1,94	0,99	0,77	0,82	0,52
	20	1,88	0,67	0,54	0,57	0,44
Silae	150	1,97	0,98	0,73	0,73	0,51
	20	1,92	0,61	0,48	0,51	0,38
Sidera	150	1,92	0,97	0,70	0,73	0,49
	66	1,83	0,86	0,61	0,66	0,40
	20	1,88	0,59	0,50	0,49	0,35
Talise	66	2,02	0,90	0,66	0,71	0,47
	20	1,86	0,62	0,50	0,52	0,40
Parigi	66	2,28	0,92	0,69	0,74	0,51
	20	2,11	0,71	0,58	0,61	0,49

Berdasarkan Tabel 4. 10 dapat dilihat perbandingan antar nilai LVUR dengan konfigurasi transposisi yang dapat dilakukan pada sistem yang dibandingkan dengan nilai LVUR sistem *eksisting*. Sistem *eksisting* saluran transmisi 275 kV merupakan sistem transmisi dengan konfigurasi *single phi* dimana saluran merupakan *double circuit* dari GI Latuppa menuju ke GI Wotu namun hanya satu *circuit* yang menuju ke GI Wotu. Sedangkan satu *circuit* lainnya melanjutkan ke GI Pamona dengan jarak 209 km. Dari perhitungan pada bab sebelumnya, diketahui bahwa nilai impedansi yang cukup timpang pada setiap sirkuit akibat adanya perbedaan pembebanan menyebabkan ketidakseimbangan tegangan terjadi pada sistem transmisi. Sehingga LVUR pada sistem *eksisting* memberikan nilai yang jauh dari ambang batas 1%.

Dengan kondisi *eksisting* yang tidak cukup memadai, maka perlu dilakukan rekonfigurasi sistem transmisi pada saluran 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa. Berdasarkan simulasi pada bab 3.4, maka dapat diketahui bahwa rekonfigurasi yang memberikan nilai LVUR paling rendah adalah dengan menghubungkan 2 circuit menuju ke GI Wotu. Perubahan konfigurasi sistem ini perlu dilakukan demi menyeimbangkan nilai impedansi saluran sehingga apabila selanjutnya dilakukan transposisi dapat memberikan nilai LVUR yang lebih rendah pada sistem. Selain itu, dengan konfigurasi transposisi yang tepat juga memberikan kontribusi untuk memberikan nilai LVUR yang semakin rendah pula.

Dengan melakukan konfigurasi sistem dapat menurunkan nilai persen ketidakseimbangan tegangan pada sistem transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa. Selanjutnya, dilakukan transposisi pada sistem sehingga nilai persen ketidakseimbangan tegangan menjadi semakin rendah dan sesuai dengan ambang batas yang telah ditetapkan NEMA yaitu sebesar 1%. Dengan melakukan tahapan tersebut, maka permasalahan ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada sistem transmisi 275 kV Pamona – Wotu – Latuppa dapat teratasi.

BAB V
PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Pada tugas akhir yang telah saya lakukan, dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Kondisi *eksisting* sistem transmisi sistem Sulbagsel dengan terhubungnya satu *circuit* saluran transmisi 275 kV menuju GI Wotu memberikan kontribusi terjadinya ketidakseimbangan tegangan ditambah seiring dengan kenaikan beban di GI Wotu sehingga ketidakseimbangan tegangan menjadi semakin besar akibat dari nilai impedansi antar fasa yang semakin timpang dikarenakan perbedaan pembebanan pada kedua *circuit* saluran transmisi 275 kV.

2. Untuk mengatasi fenomena ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada saluran 275 kV dapat dilakukan dengan mengubah konfigurasi sistem *eksisting* yaitu mengubah *single circuit* menuju GI Wotu menjadi *double circuit.* Perubahan konfigurasi tersebut dilakukan agar dapat memberikan nilai pembebanan yang sama pada kedua *circuit* sehingga nilai impedansi antar fasa tidak akan terjadi ketimpangan.

3. Konfigurasi transposisi yang menghasilkan nilai LVUR yang cukup tinggi walaupun masih di bawah ambang batas adalah konfigurasi transposisi 1 yang mencapai 0,73% di GI Silae.

4. Konfigurasi transposisi yang menghasilkan nilai LVUR yang paling rendah adalah konfigurasi transposisi 3 yang mencapai 0,04% di GI Latuppa dan GI Wotu.

5. Konfigurasi Transposisi pada sistem transmisi 275 kV dapat mengurangi ketidakseimbangan tegangan menuju ambang batas yang disetujui yaitu dibawah 1% berdasarkan LVUR yang ditetapkan oleh NEMA MG 1-1993 .

5.2. Saran

Saran untuk penelitian kedepan adalah:

1. Untuk pengembangan sistem transmisi Sulbagsel 275 kV kedepannya, apabila *double circuit* telah dihubungkan menuju ke GI Wotu dan diperlukan adanya titik transposisi. Berdasarkan data tower yang ada pada sistem kelistrikan Sulbagsel, titik transposisi dapat ditunjukkan pada titik transposisi A, B, C dan D yang ditunjukkan pada Lampiran 3.

2. Mengembangkan lebih lanjut penelitian mengenai fenomena ketidakseimbangan yang terjadi pada GI 150 kV pada sistem kelistrikan Sulawesi bagian Selatan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Saadat, Power System Analysis, Boston.

[2] V. Gosbell, Voltage Unbalance Technical Note, Australia: Integral Energy Power Quality Center, 2002.

[3] S. Zhong and A. Abur, "Effects of Non transposed Lines and Unbalanced Loads on," *IEEE,* Vols. 0-7803-7322-7/02, pp. 975-979, 2002.

[4] C. Fortescue, "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks," *34th Annual convention of the American institute of,* vol. 36, p. 1027–140, 1918.

[5] R. Dugan, M. McGranaghan and H. Beaty, Electrical Power Systems Quality, New York: McGraw-Hill, 1996.

[6] ANSI/NEMA Standard MG1-1993, "Motors and Generators".

[7] K. L. Lo and C. Zhang, "De composed three-phase power-flow solution Using the Sequence component Frame," *IEEProcedings-C,* vol. Vol. 140, no. No. 3, pp. 181 -188, 1993.

[8] A. Von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of Voltage Unbalance," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY,* vol. 16, no. 4, 2001,

[9] T. Gonen, Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design, Sacramento: CRC Press, 2014.

[10] W. YAW-JUEN and S.-J. LIU, "A Review of Methods for Calculation of Frequency-dependent Impedance of Overhead Power Transmission Lines," *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A),* vol. Vol. 25, no. No. 6, pp. 329-338, 2001,

[11] H. H. El-Tamaly and H. A. Ziedan, "SEQUENCE IMPEDANCES OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES CARSON'S METHOD VERSUS RUDENBERG'S METHOD".

[12] A. M. Gashimov, A. R. Babayeva and N. Ahmet, "TRANSMISSION LINE TRANSPOSITION".

[13] J. B. Mooney, "Economic Analysis and Justification for Transmission Line Transposition," 2010,

[14] E. Gross and A. Weston, "Transposition of High-Voltage Overhead Lines and Elimination of Electrostatic Unbalance to

Ground," *AIEE Transactions Power Apparatus and Systems,* vol. PAS – 70, no. 2, p. 1837–1844, 1951,

[15] H. Holley, D. Coleman and R. Shipley, "Untransposed EHV Line Computations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* vol. PAS – 83, no. 3, p. 291–296, 1964.

[16] S. D. Boeck and D. V. Hertem, "Integration of Distributed PV in Existing and Future," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 9, no. 2, pp. 876 - 885, 2018.

[17] K. Das, A. Nitsas, M. Altin, A. D. Hansen and P. E. Sørensen, "Improved Load Shedding Scheme considering Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Delivery,* pp. 1-10, 2017.

[18] I. Jonan, Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019-2028, Jakarta: Kementerian ESDM Republik Indonesia, 2019.

[19] H. Xu, U. Topcu, S. H. Low, C. R. Clarke and K. M. Chandy, "Load-shedding probabilities with hybrid renewable power generation," *Forty-Eighth Annual Allerton Conference,* pp. 233-239, 2010,

[20] P. Paranavithana, S. Perera and D. Sutanto, "Impact of Untransposed 66 kV Sub-transmission lines on Voltage Unbalance," 2007.

[21] A. Elguera and M. Tavares, "Influence of Transmission Line Transposition in Electromagnetic Transients Phenomena," *IEEE,* 2007.

[22] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance," *IEEE Power Engineering Review,* 2001,

[23] H. Sujatmiko, "ANALISIS KERUGIAN DAYA PADA SALURAN TRANSMISI TEGANGAN EKSTRA TINGGI 500," *Jurnal Teknik Elektro* , vol. Vol. 1 , no. No.1, p. 33, Januari - Juni 2009.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Program Matlab untuk perhitungan nilai matriks reaktansi (X)

```
% SYARAT JARAK ANTAR CIRCUIT = 2 X JARAK ANTAR PHASA
% DATA AWAL

    L        = 96.615;              % kM - Panjang Transmisi
    f        = 50;                  % Hz - Frekwensi
    G        = 0,1609347*10^(-3);   % Ohm/mile - Konstanta Carson
    d        = 7.45;                % meter - jarak antar phasa
    d_cond   = 0,45;                % meter - jarak antar conductor
    hA       = 45.875;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hB       = 38.425;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hC       = 30,975;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hD       = 45.875;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hE       = 38.425;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hF       = 30,975;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah

    GMR     = 0,01093;              % m - GMR konduktor
    r_cond  = 0,0135;               % m - jari - jari
    p       = 100;                  % ohm.m - resistivity tanah
    X       = zeros(6,6);           % X - tidak ada beda arus
    Xi      = zeros(6,6);           % X - ada beda arus
    GMR_upt = sqrt(GMR*d_cond);

    %% PEMBAGIAN ARUS

    IA     = 10,49;                % A - arus
    IB     = 10,49;                % A - arus
    IC     = 10,49;                % A - arus
    ID     = 10,49;                % A - arus
    IE     = 10,49;                % A - arus
    IF     = 10,49;                % A - arus

    I_AA    = IA;
    I_BB    = IB;
    I_CC    = IC;
    I_DD    = ID;
    I_EE    = IE;
    I_FF    = IF;

    %% REAL

    D_AA    = 1;
    D_BB    = 1;
    D_CC    = 1;
    D_DD    = 1;
    D_EE    = 1;
    D_FF    = 1;
    D_AB    = d;
    D_AC    = 2*d;
    D_AD    = 2*d;
```

```
D_AE    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_AF    = sqrt((2*d)^2+(2*d)^2);
D_BC    = d;
D_BD    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_BE    = 2*d;
D_BF    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_CD    = sqrt((2*d)^2+(2*d)^2);
D_CE    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_CF    = 2*d;
D_DE    = d;
D_DF    = 2*d;
D_EF    = d;

%% IMAJINER

d_AA    = hA;
d_BB    = hB;
d_CC    = hC;
d_DD    = hD;
d_EE    = hE;
d_FF    = hF;

d_AB    = hA + hB;
d_AC    = hA + hC;
d_AD    = sqrt((2*d)^2+(hA+hD)^2);
d_AE    = sqrt((2*d)^2+(hA+hE)^2);
d_AF    = sqrt((2*d)^2+(hA+hF)^2);

d_BC    = hB + hC;
d_BD    = sqrt((2*d)^2+(hB+hD)^2);
d_BE    = sqrt((2*d)^2+(hB+hE)^2);
d_BF    = sqrt((2*d)^2+(hB+hF)^2);

d_CD    = sqrt((2*d)^2+(hC+hD)^2);
d_CE    = sqrt((2*d)^2+(hC+hE)^2);
d_CF    = sqrt((2*d)^2+(hC+hF)^2);

d_DE    = hD + hE;
d_DF    = hD + hF;

d_EF    = hE + hF;

D_real      =  [D_AA D_AB D_AC D_AD D_AE D_AF;
                D_AB D_BB D_BC D_BD D_BE D_BF;
                D_AC D_BC D_CC D_CD D_CE D_CF;
                D_AD D_BD D_CD D_DD D_DE D_DF;
                D_AE D_BE D_CE D_DE D_EE D_EF;
                D_AF D_BF D_CF D_DF D_EF D_FF];

D_imajiner  =  [d_AA d_AB d_AC d_AD d_AE d_AF;
                d_AB d_BB d_BC d_BD d_BE d_BF;
                d_AC d_BC d_CC d_CD d_CE d_CF;
                d_AD d_BD d_CD d_DD d_DE d_DF;
                d_AE d_BE d_CE d_DE d_EE d_EF;
                d_AF d_BF d_CF d_DF d_EF d_FF];

I           =  [I_AA IA/IB IA/IC IA/ID IA/IE IA/IF;
```

```
                    IB/IA I_BB IB/IC IB/ID IB/IE IB/IF;
                    IC/IA IC/IB I_CC IC/ID IC/IE IC/IF;
                    ID/IA ID/IB ID/IC I_DD ID/IE ID/IF;
                    IE/IA IE/IB IE/IC IE/ID I_EE IE/IF;
                    IF/IA IF/IB IF/IC IF/ID IF/IE I_FF];

%% PERHITUNGAN REAKTANSI

 pp      = sqrt(p/(2*pi*f*(4*pi*10^-7)));
 for i = 1:6
     for j = 1:6
         if i==j % Self Reactance
             X1(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log(2*(D_imajiner(i,j)+pp)/GMR_upt));
         else
             X1(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log((D_imajiner(i,j)+2*pp)/D_real(i,j)));
         end
     end
 end

%% PERHITUNGAN REAKTANSI DENGAN ADANYA BEDA ARUS

 pp      = sqrt(p/(2*pi*f*(4*pi*10^-7)));
 for i = 1:6
     for j = 1:6
         if i==j % Self Reactance
             Xi1(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log(2*(D_imajiner(i,j)+pp)/GMR_upt));
         else
             Xi1(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log((D_imajiner(i,j)+2*pp)/D_real(i,j)))*I(i,j);
         end
     end
 end


%% TOTAL PERHITUNGAN REAKTANSI DENGAN ADANYA BEDA ARUS
Xi1
Xi_1_total = Xi1,*L

%%
%% DOUBLE CIRCUIT DAN DOUBLE CONDUCTOR

% SYARAT JARAK ANTAR CIRCUIT = 2 X JARAK ANTAR PHASA
% DATA AWAL

    L        = 115.183;              % kM - Panjang Transmisi
    f        = 50;                   % Hz - Frekwensi
    G        = 0,1609347*10^(-3);    % Ohm/mile - Konstanta Carson
    d        = 7.45;                 % meter - jarak antar phasa
    d_cond   = 0,45;                 % meter - jarak antar conductor
    hA       = 45.875;               % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hB       = 38.425;               % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hC       = 30,975;               % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hD       = 45.875;               % m - Tinggi Saluran dari Tanah
    hE       = 38.425;               % m - Tinggi Saluran dari Tanah
```

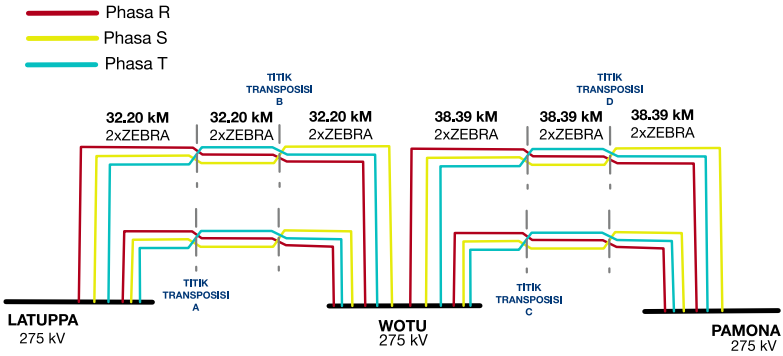
```
hF       = 30,975;              % m - Tinggi Saluran dari Tanah

GMR      = 0,01093;             % m - GMR konduktor
r_cond   = 0,0135;              % m - jari - jari
p        = 100;                 % ohm.m - resistivity tanah
X        = zeros(6,6);          % X - tidak ada beda arus
Xi       = zeros(6,6);          % X - ada beda arus
GMR_upt = sqrt(GMR*d_cond);

%% PEMBAGIAN ARUS

IA      = 10,49;                % A - arus
IB      = 10,49;                % A - arus
IC      = 10,49;                % A - arus
ID      = 10,49;                % A - arus
IE      = 10,49;                % A - arus
IF      = 10,49;                % A - arus

I_AA    = IA;
I_BB    = IB;
I_CC    = IC;
I_DD    = ID;
I_EE    = IE;
I_FF    = IF;

%% REAL

D_AA    = 1;
D_BB    = 1;
D_CC    = 1;
D_DD    = 1;
D_EE    = 1;
D_FF    = 1;
D_AB    = d;
D_AC    = 2*d;
D_AD    = 2*d;
D_AE    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_AF    = sqrt((2*d)^2+(2*d)^2);
D_BC    = d;
D_BD    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_BE    = 2*d;
D_BF    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_CD    = sqrt((2*d)^2+(2*d)^2);
D_CE    = sqrt((2*d)^2+d^2);
D_CF    = 2*d;
D_DE    = d;
D_DF    = 2*d;
D_EF    = d;

%% IMAJINER

d_AA    = hA;
d_BB    = hB;
d_CC    = hC;
d_DD    = hD;
d_EE    = hE;
d_FF    = hF;
```

```
    d_AB    = hA + hB;
    d_AC    = hA + hC;
    d_AD    = sqrt((2*d)^2+(hA+hD)^2);
    d_AE    = sqrt((2*d)^2+(hA+hE)^2);
    d_AF    = sqrt((2*d)^2+(hA+hF)^2);

    d_BC    = hB + hC;
    d_BD    = sqrt((2*d)^2+(hB+hD)^2);
    d_BE    = sqrt((2*d)^2+(hB+hE)^2);
    d_BF    = sqrt((2*d)^2+(hB+hF)^2);

    d_CD    = sqrt((2*d)^2+(hC+hD)^2);
    d_CE    = sqrt((2*d)^2+(hC+hE)^2);
    d_CF    = sqrt((2*d)^2+(hC+hF)^2);

    d_DE    = hD + hE;
    d_DF    = hD + hF;

    d_EF    = hE + hF;

    D_real      =  [D_AA D_AB D_AC D_AD D_AE D_AF;
                    D_AB D_BB D_BC D_BD D_BE D_BF;
                    D_AC D_BC D_CC D_CD D_CE D_CF;
                    D_AD D_BD D_CD D_DD D_DE D_DF;
                    D_AE D_BE D_CE D_DE D_EE D_EF;
                    D_AF D_BF D_CF D_DF D_EF D_FF];

    D_imajiner  =  [d_AA d_AB d_AC d_AD d_AE d_AF;
                    d_AB d_BB d_BC d_BD d_BE d_BF;
                    d_AC d_BC d_CC d_CD d_CE d_CF;
                    d_AD d_BD d_CD d_DD d_DE d_DF;
                    d_AE d_BE d_CE d_DE d_EE d_EF;
                    d_AF d_BF d_CF d_DF d_EF d_FF];

    I           =  [I_AA IA/IB IA/IC IA/ID IA/IE IA/IF;
                    IB/IA I_BB IB/IC IB/ID IB/IE IB/IF;
                    IC/IA IC/IB I_CC IC/ID IC/IE IC/IF;
                    ID/IA ID/IB ID/IC I_DD ID/IE ID/IF;
                    IE/IA IE/IB IE/IC IE/ID I_EE IE/IF;
                    IF/IA IF/IB IF/IC IF/ID IF/IE I_FF];

%% PERHITUNGAN REAKTANSI

 pp      = sqrt(p/(2*pi*f*(4*pi*10^-7)));
 for i = 1:6
     for j = 1:6
         if i==j % Self Reactance
             X2(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log(2*(D_imajiner(i,j)+pp)/GMR_upt));
         else
             X2(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log((D_imajiner(i,j)+2*pp)/D_real(i,j)));
         end
     end
 end
```

```
%% PERHITUNGAN REAKTANSI DENGAN ADANYA BEDA ARUS

 pp      = sqrt(p/(2*pi*f*(4*pi*10^-7)));
 for i = 1:6
     for j = 1:6
         if i==j % Self Reactance
             Xi2(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log(2*(D_imajiner(i,j)+pp)/GMR_upt));
         else
             Xi2(i,j)  = 2*(2*pi*f)*(10^-
4)*(log((D_imajiner(i,j)+2*pp)/D_real(i,j)))*I(i,j);
         end
     end
 end


%% TOTAL PERHITUNGAN REAKTANSI DENGAN ADANYA BEDA ARUS
Xi2
Xi_2_total = Xi2.*L

X_TOTAL = Xi_1_total + Xi_2_total
```

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 2
Mapping Lokasi Tower

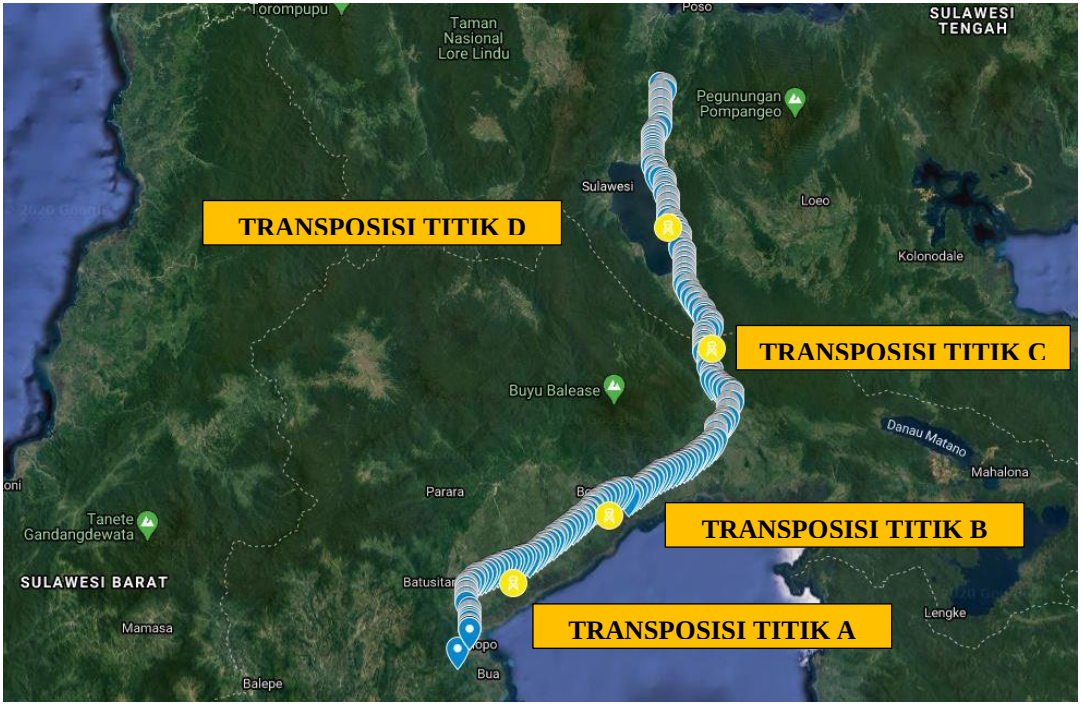


Mengacu pada konfigurasi tersebut, maka tower transposisi akan berjarak 32.20 km antar tower. Berdasarkan data tower yang diterima dari pihak PT. PLN UIKL Sulawesi, maka tower transposisi akan berada pada lokasi sebagai berikut :

Tabel Lampiran 2. 1 Titik transposisi pada sistem Sulbagsel

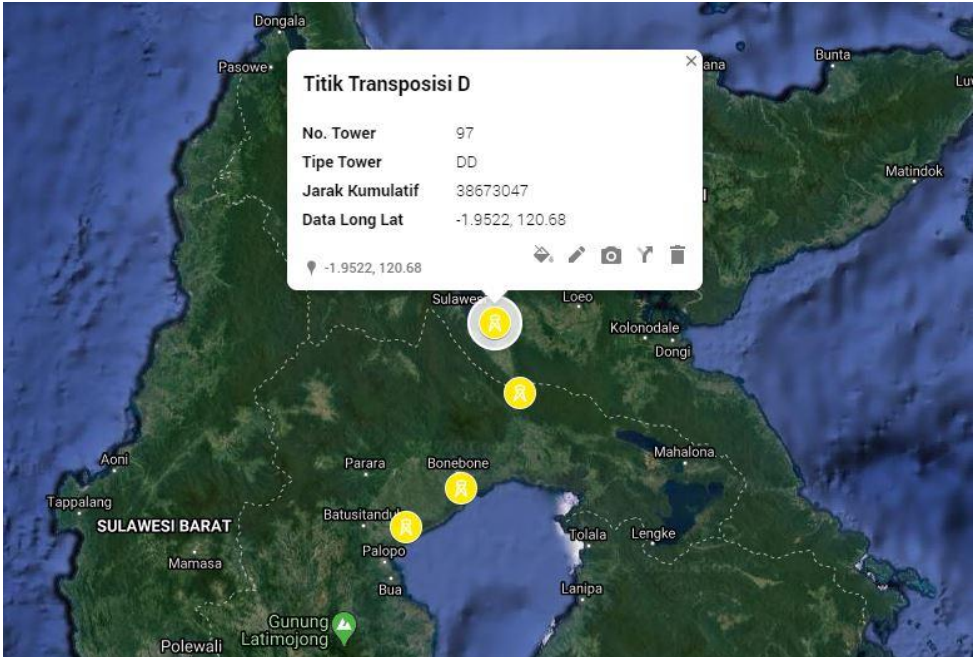
Titik Transposisi	No. Tower	Tipe Tower	Jarak Kumulatif	Data Long Lat
Titik Transposisi D	97	DD	38673,047	-1,9522,120,68
Titik Transposisi C	193	DD	76100,2296	-2.258,120,79
Titik Transposisi B	382	CC	147543,1366	-2.6772,120,53
Titik Transposisi A	463	BB	179881,4366	-2.8457,120,29

Sehingga dapat dilakukan mapping yang dapat dilihat pada gambar berikut ini.



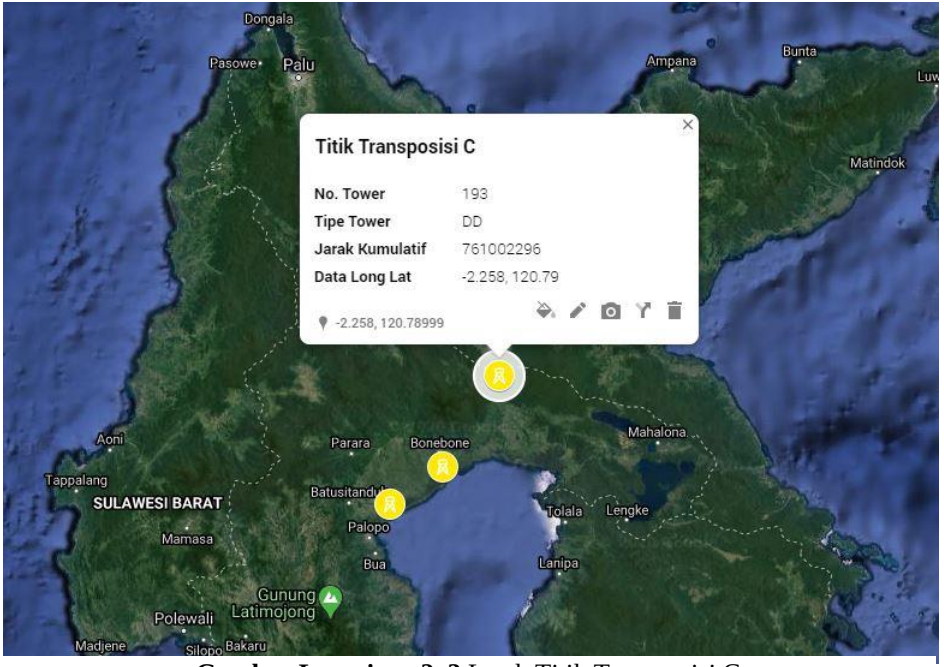
Gambar Lampiran 2. 1 Overview Tower Sistem Transmisi 275 kV Pamona-Wotu-Latuppa

TITIK TRANSPOSISI D



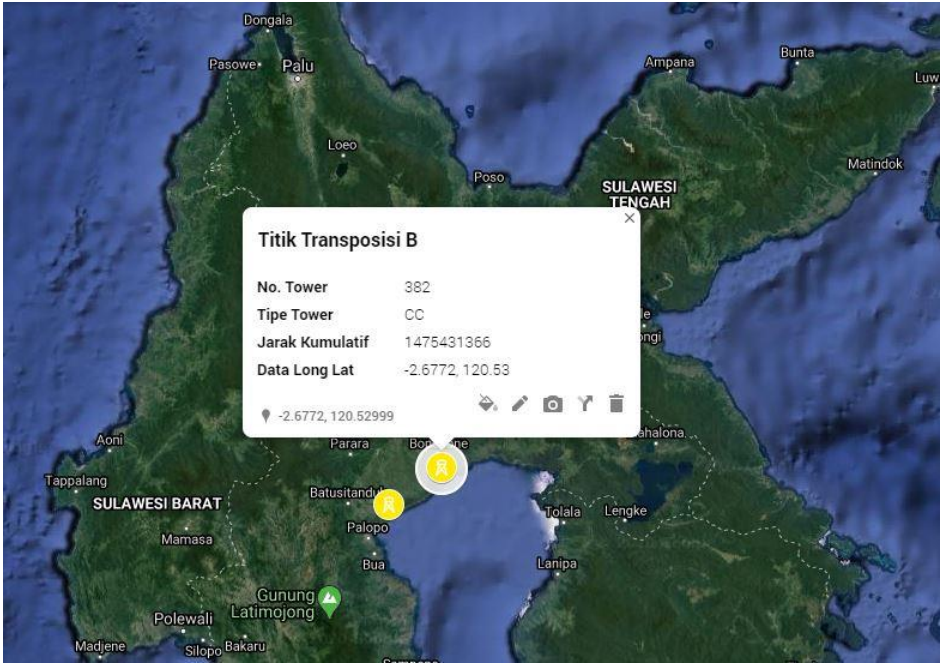
Gambar Lampiran 2. 2 Letak Titik Transposisi D

TITIK TRANSPOSISI C



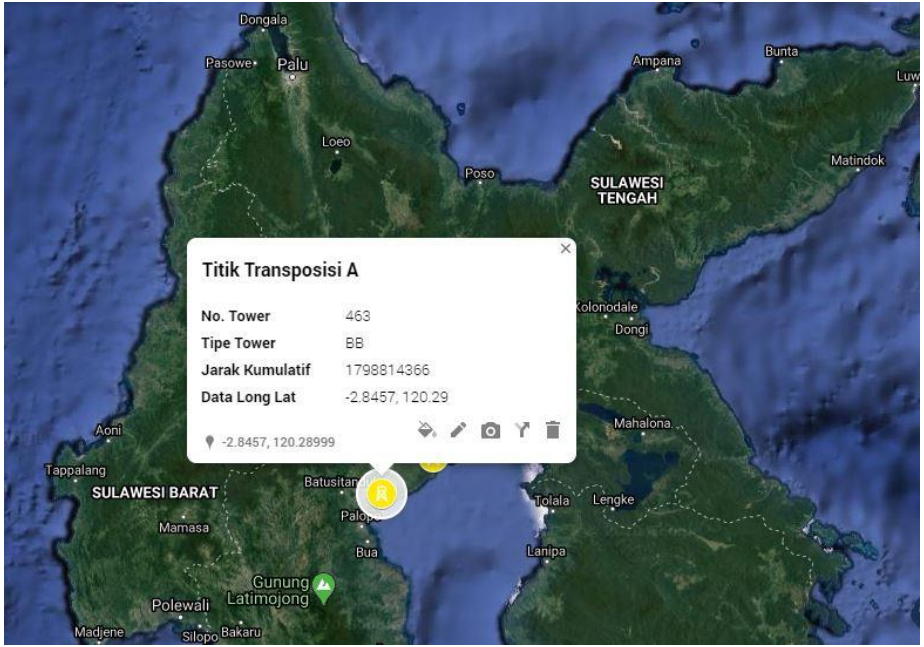
Gambar Lampiran 2. 3 Letak Titik Transposisi C

TITIK TRANSPOSISI B



Gambar Lampiran 2. 4 Letak Titik Transposisi B

TITIK TRANSPOSISI A

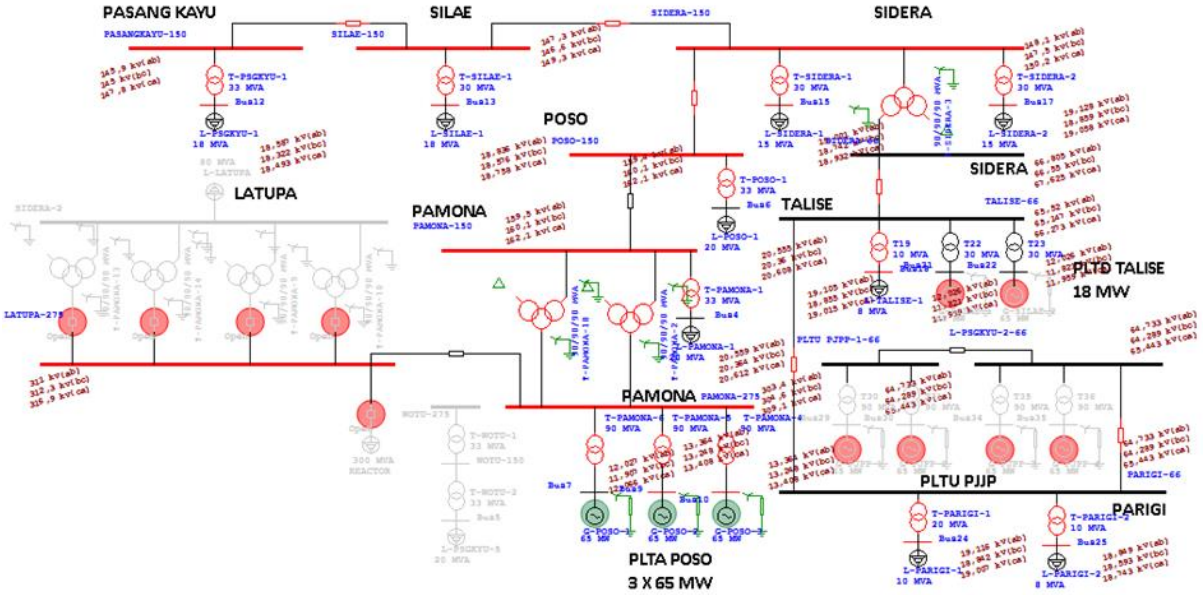


Gambar Lampiran 2. 5 Letak Titik Transposisi A

Lampiran 3

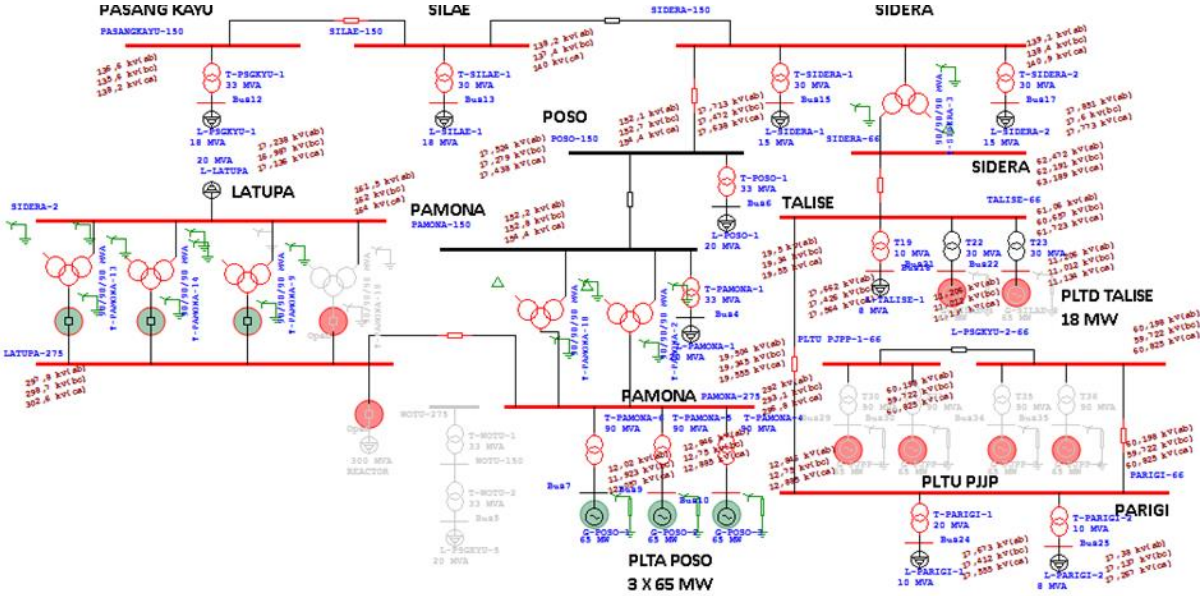
Hasil simulasi *unbalance load flow*

1. Simulasi Untransposed *Double circuit* Tanpa Terhubung ke GI Wotu dan Tanpa Beban (no load)



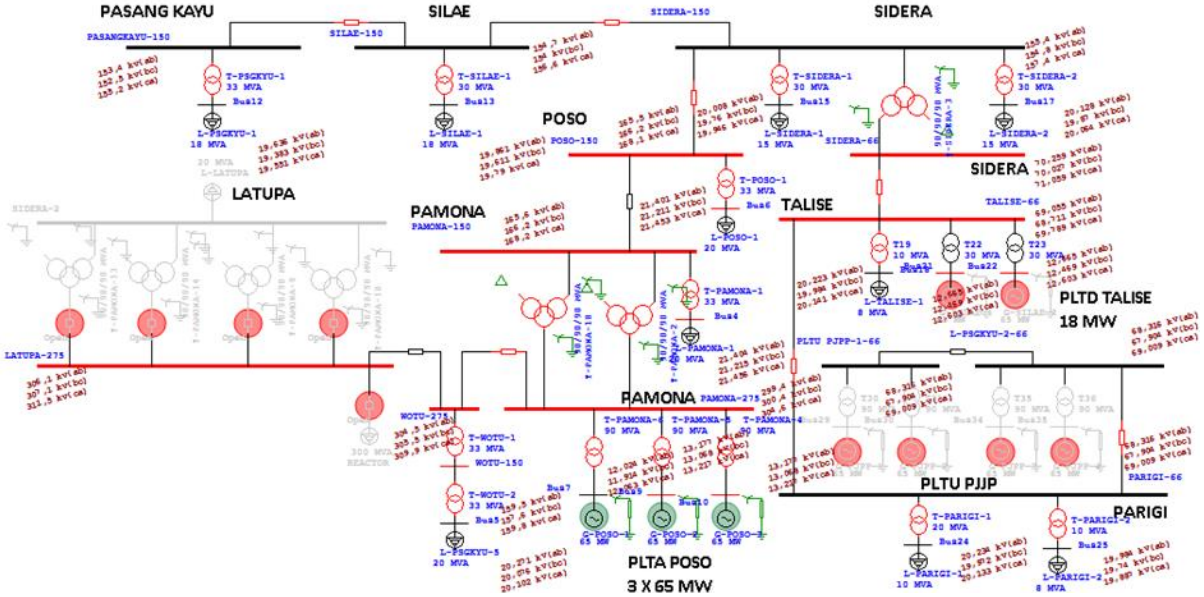
Gambar Lampiran 3. 1 Hasil LF Unbalance tanpa terhubung ke GI Wotu – no load

2. Simulasi Untransposed *Double circuit* Tanpa Terhubung ke GI Wotu dengan Beban (20 MVA)



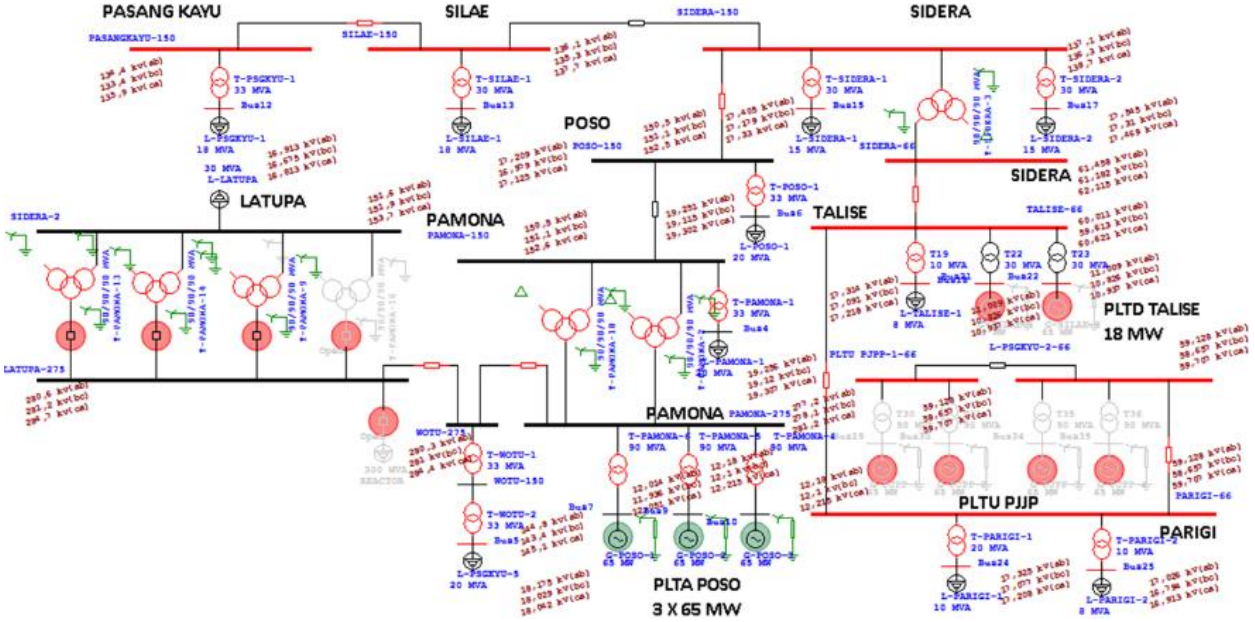
Gambar Lampiran 3. 2 Hasil LF Unbalance tanpa terhubung ke GI Wotu – *on load*

3. Simulasi Untransposed *Double circuit* Terhubung ke GI Wotu dan Tanpa Beban *(no load)*



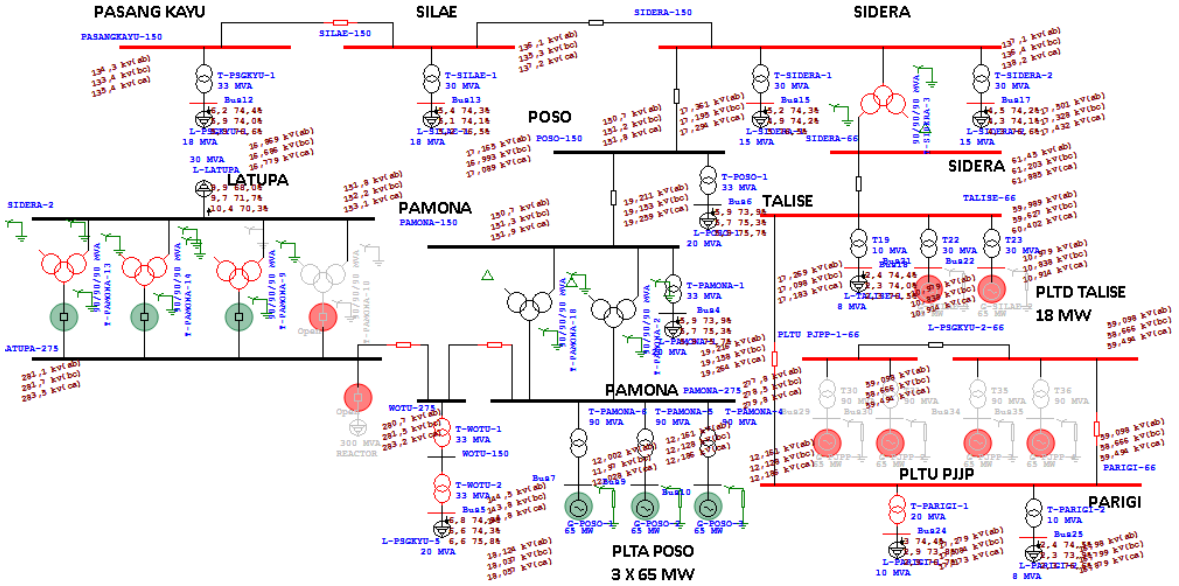
Gambar Lampiran 3. 3 Hasil LF Unbalance terhubung ke GI Wotu – no load

4. Simulasi Untransposed *Double circuit* Terhubung ke GI Wotu dengan Beban (20 MVA)



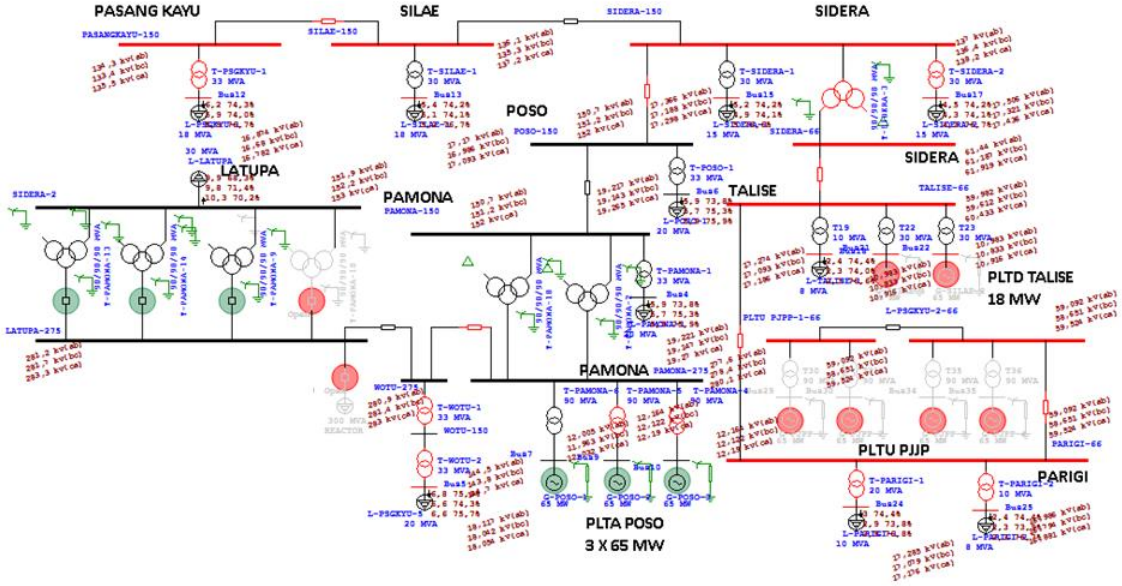
Gambar Lampiran 3. 4 Hasil LF Unbalance terhubung ke GI Wotu – on load

5. Hasil *Loadflow Unbalance* Konfigurasi Transposisi 1



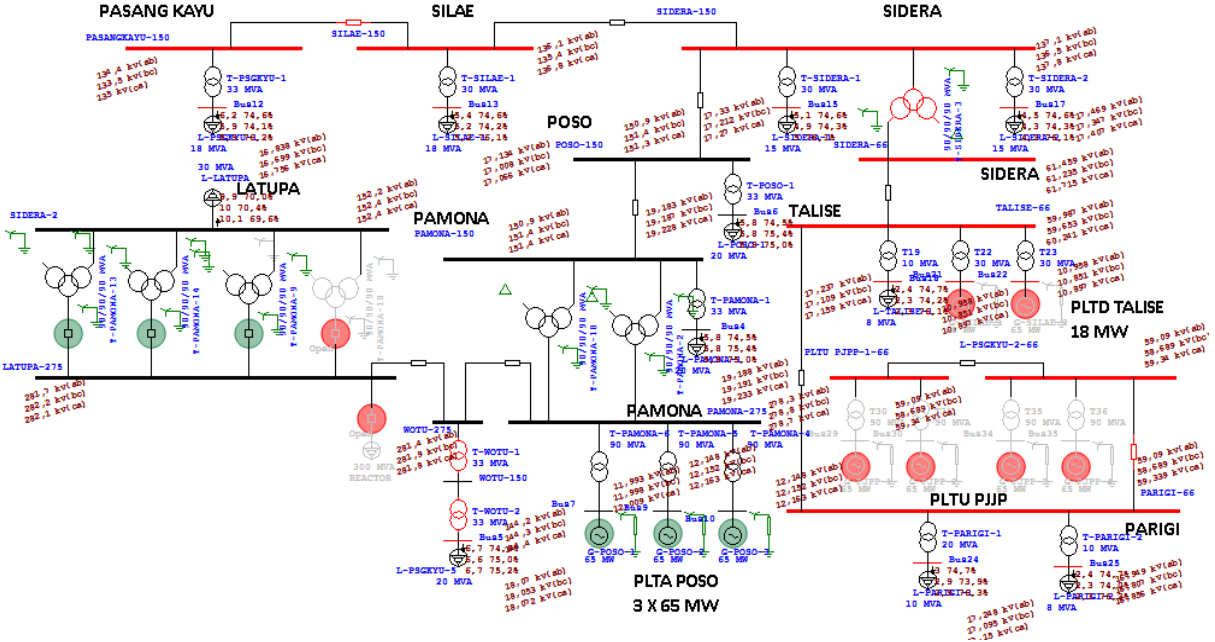
Gambar Lampiran 3. 5 Hasil LF Unbalance Konfigurasi Transposisi 1

6. Hasil *run loadlflow unbalance* Konfigurasi 2



Gambar Lampiran 3. 6 Hasil LF Unbalance Konfigurasi 2

7. Hasil *run loadflow unbalance* Konfigurasi transposisi



Gambar Lampiran 3. 7 Hasil LF Unbalance Konfigurasi transposisi 3

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP

Aldy Yuniar Pratama, putra pertama dari Iwan Sugih Arto dan Siti Munadiroh yang lahir pada 07 Juni 1997 di Sidoarjo. Penulis menyelesaikan Pendidikan formal di SD Negeri Jati Sidoarjo pada tahun 2010, SMP Negeri 1 Sidoarjo pada tahun 2013, dan SMAN 2 Sidoarjo pada tahun 2016. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan menjadi mahasiswa Teknik Elektro ITS Surabaya dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis aktif pada beberapa kegiatan kepanitiaan yaitu sebagai staff *Public Relation* ITS Expo 2017. Pada tahun 2018 pula penulis aktif sebagai Kepala Departemen Eksebisi UKM Click Institut Teknologi Surabaya. Selain itu, pada tahun 2019 penulis aktif sebagai wakil ketua event Evolty Fakultas Teknologi Elektro. Penulis juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik Teknik Elektro ITS. Semasa menjadi asisten, penulis juga berkecimpung dalam pengabdian masyarakat, penelitian, dan project kerjasama dengan berbagai pihak luar kampus. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: aldyyuniar@gmail.com