

SKRIPSI

**STUDI ALIRAN DAYA DAN KONTINGENSI PADA SISTEM
KELISTRIKAN SULBAGSEL DENGAN PENAMBAHAN
TRANSMISI 500 KV**

Disusun dan diajukan oleh:

FATHURRAHMAN ABBAS . AP

D041 17 1001



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI ALIRAN DAYA DAN KONTINGENSI PADA SISTEM KELISTRIKAN SULBAGSEL DENGAN PENAMBAHAN TRANSMISI 500 KV

Disusun dan diajukan oleh

Fathurrahman Abbas . AP

D041171001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 25 Juni 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T
NIP 19760914 200801 1 006

Pembimbing Pendamping,



Ir. Tajuddin Waris, M.T.
NIP 19650424 199203 1 003

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Fathurrahman Abbas . AP

NIM : D041171001

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI ALIRAN DAYA DAN KONTINGENSI PADA SISTEM KELISTRIKAN SULBAGSEL DENGAN PENAMBAHAN TRANSMISI 500 KV

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

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

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

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

Gowa, 25 Juni 2024

Yang Menyatakan



Fathurrahman Abbas . AP





ABSTRAK

FATHURRAHMAN ABBAS AP, Studi Aliran Daya dan Kontingensi pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel dengan Penambahan Transmisi 500 kV (dibimbing oleh Ikhlas Kitta dan Tajuddin Waris).

Sistem kelistrikan Sulbagsel terus mengalami peningkatan beban listrik dari tahun ke tahun. Terutama naiknya beban industri di Sulawesi Tenggara serta naiknya beban di Makassar dan sekitarnya sebagai pusat beban. Maka untuk menyalurkan energi listrik dalam jumlah sangat besar ke pusat beban yang lokasinya berjauhan dengan pusat pembangkit, perlunya dibangun transmisi tegangan ekstra tinggi sebagai *backbone* sesuai RUPTL PLN. Penambahan transmisi 500 kV ke dalam sistem kelistrikan memerlukan pemodelan *single line diagram* baru untuk digunakan dalam analisa aliran daya dan kontingensi ulang agar sistem kelistrikan menjadi handal, efisien, dan optimal. Terdapat dua simulasi pada penelitian ini, yaitu pertama adalah simulasi aliran daya sistem kelistrikan Sulbagsel eksisting/tanpa transmisi 500 kV dengan simulasi aliran daya sistem kelistrikan Sulbagsel perencanaan/terinterkoneksi transmisi 500 kV di mana kedua sistem tersebut menggunakan beban yang telah di-*upgared* sesuai RUPTL, dan kedua adalah simulasi kontingensi N-1 dan N-2 yang dilakukan pada saluran transmisi 500 kV yang ada dalam sistem Sulbagsel. Pada simulasi pertama, dilakukan dalam dua kondisi skenario operasi yaitu kondisi beban puncak siang dan malam. Dan didapatkan hasil bahwa sistem kelistrikan Sulbagsel perencanaan menghasilkan daya reaktif (Q_c) dari fenomena *line charging* yang lebih besar dibanding sistem kelistrikan Sulbagsel eksisting (tanpa transmisi 500 kV), sehingga membuat profil tegangan bus pada sistem perencanaan masih sesuai standar (tidak berada di bawah 0,95pu), di mana dalam sistem eksisting sebagian besar profil tegangan bus turun sampai melewati batas normal (di bawah 0,95pu). Pada simulasi kedua juga dilakukan dalam dua kondisi skenario. Dan diapatkan hasil bahwa kasus kontingensi N-1 terhadap saluran transmisi 500 kV menyebabkan naiknya nilai pembebanan dalam jumlah kecil melewati 80% pada beberapa trafo, sedangkan untuk kasus kontingensi N-2 selain membuat pembebanan pada beberapa trafo naik melewati batas yaitu 80% juga membuat tegangan pada beberapa bus menurun melewati batas ketentuan (dibawah 0,95 pu).

Kata Kunci: Aliran Daya, *Line Charging*, Kontingensi

ABSTRACT

FATHURRAHMAN ABBAS AP, Load Flow and Contingency Study for South Sulawesi Power System with 500 kV Transmission Addition (supervised by Ikhlas Kitta and Tajuddin Waris).

The electricity system in South Sulawesi continues to experience an increase in electricity load year on year. Especially the increase of industrial load in South East Sulawesi and the increase of load in Makassar and its surroundings as a load centre. Therefore, in order to distribute a very large amount of electrical energy to the load centre, which is located far away from the power plant centre, it is necessary to build an extra-high voltage transmission line as a backbone according to PLN's RUPTL. The addition of 500 kV transmission to the power system requires new single line diagram modelling to be used in power flow analysis and re-contingency to make the power system reliable, efficient and optimal. There are two simulations in this study, the first is a power flow simulation of the existing South Sulawesi power system without 500 kV transmission with a power flow simulation of the planned South Sulawesi power system/interconnected 500 kV transmission where both systems use loads that have been upgraded according to the RUPTL, and the second is the N-1 and N-2 contingency simulation performed on the existing 500 kV transmission line in the South Sulawesi system. In the first simulation, two operating scenario conditions were carried out, namely day and night peak load conditions. It was found that the planned South Sulawesi power system generates reactive power (Q_c) from the line charging phenomenon which is greater than the existing South Sulawesi power system (without 500 kV transmission), so the bus voltage profile in the planned system is still according to standards (not below 0.95pu), whereas in the existing system most of the bus voltage profile drops until it exceeds the normal limit (below 0.95pu). The second simulation was also carried out under two scenario conditions. And the results showed that the N-1 contingency case on the 500 kV transmission line caused a small increase in the load value over 80% on several transformers, while for the N-2 contingency case, in addition to increasing the load on several transformers over the 80% limit, it also caused the voltage on several buses to drop over the regulatory limit (below 0.95 pu).

Keywords: Load Flow, Line Charging, Contingency



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Allah *Shubahanahu Wa Ta'ala*, karena berkat rahmat dan ridha-Nya yang senantiasa memberikan kesehatan dan kemampuan berpikir kepada penulis sehingga tugas skripsi ini dapat terselesaikan. Shalawat dan salam tidak lupa diucapkan kepada Baginda Rasulullah *Shallallahu 'Alaihi Wa Sallam* yang merupakan sebaik-baiknya suri tauladan.

Alhamdulillahirrobbil 'alamin, akhirnya penulisan skripsi dengan judul **“Studi Aliran Daya Dan Kontingensi Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Dengan Penambahan Transmisi 500 kV”** dapat terselesaikan, guna memenuhi syarat dalam menyelesaikan pendidikan di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

Penulis mempersembahkan secara spesial kepada kedua orang tua tersayang, **H. Abbas Saleng, S.Ag Rahimahullah** dan **Suriana, S.S** yang telah berjuang keras membesarkan, membimbing, dan mengarahkan penulis hingga mampu menyelesaikan pendidikan S1 di perguruan tinggi. Setiap jasa dan curahan kasih sayang keduanya tentu tidak akan sanggup terbalaskan oleh penulis dengan apa pun. Penulis juga mempersembahkan skripsi ini kepada kakak tercinta, **Taufiqurrahman Abbas.AP** yang selalu memotivasi dan tidak hentinya mendoakan kebaikan untuk penulis.

Terselesainya skripsi ini juga tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan inidengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. Ketua Departemen Teknik Elektro.
2. Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan kritik dan saran bimbingan maupun arahan yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.



3. Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T. Dan Bapak Ir. Gassing, M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
4. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.
5. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UPB Makassar.
6. Kepada sahabat saya Alfathi Adam, Rudirga Hadi Saputra, Muhammad Rafly Ramadhan, Agus Listin, Faathir Haq, Algazali yang selalu memberi semangat dan dorongan motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Kepada senior serta teman-teman Lab Teknik Tegangan Tinggi & Infrastruktur Ketenagalistrikan yang selalu memberi saran selama kegiatan riset penelitian tugas akhir ini.
8. Kepada rekan-rekan EQUAL17ER angkatan 2017 Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang sejak pertama menginjakkan kaki di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama penulis untuk menuntut ilmu di kampus tercinta ini.
9. Dan kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Akhir kata semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, aamiin.

Makassar, 20 Juni 2024

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PERNYATAAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Metode Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.1.1 Sistem Tenaga Listrik Sulbagsel.....	10
2.2 Saluran Transmisi.....	11
2.2.1 Saluran Transmisi Pendek.....	12
2.2.2 Saluran Transmisi Menengah.....	13
2.2.3 Saluran Transmisi Panjang.....	16
2.3 Daya.....	17
2.4 Aliran Daya.....	18
2.5 Kontingensi.....	20
2.6 Metode Newton-Raphson.....	21
2.7 DigSILENT.....	25
BAB III DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Judul Penelitian.....	27
3.2 Waktu dan lokasi Penelitian.....	27



3.3 Data-data yang diperlukan.....	27
3.5 Alur Penelitian.....	54
3.6 Perencanaan Simulasi.....	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1 Interkoneksi Transmisi 500 kV Pada Sistem Sulbagsel.....	59
4.2 Hasil Simulasi <i>Load flow</i> Pada Sistem Kelistrikan sulbagsel.....	63
4.2.1 <i>Total System Summary</i> Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Tanpa Interkoneksi Transmisi 500 kV.....	64
4.2.1.1 Tegangan Di setiap Bus Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Tidak Terinterkoneksi Transmisi 500 kV.....	71
4.2.1.2 Arah Aliran Daya & Arus Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Tidak Terinterkoneksi Dengan Transmisi 500 kV.....	92
4.2.2 <i>Total System Summary</i> Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Dengan Interkoneksi Transmisi 500 kV.....	96
4.2.2.1 Tegangan Di setiap Bus Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Terinterkoneksi Transmisi 500 kV.....	104
4.2.2.2 Arah Aliran Daya & Arus Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Terinterkoneksi Dengan Transmisi 500 kV.....	126
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Load flow</i> Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Antara Keadaan Perencanaan dengan Eksisting.....	129
4.3.1 Perbedaan <i>Total System Summary</i> Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua.....	130
4.3.1.1 Perbedaan <i>Total System Summary</i> Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua Saat Kondisi Beban Puncak Siang.....	131
4.3.1.2 Perbedaan <i>Total System Summary</i> Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua Saat Kondisi Beban Puncak Malam.....	140
4.3.2 Perbedaan Tegangan Setiap Bus & Arah Aliran Daya Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua.....	149



4.3.2.1 Perbedaan Tegangan Setiap Bus & Arah Aliran Daya Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua Saat Beban Puncak Siang Hari.....	149
4.3.2.2 Perbedaan Tegangan Setiap Bus & Arah Aliran Daya Dari Simulasi <i>Load flow</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk <i>Variation</i> Satu Dengan <i>Variation</i> Dua Saat Beban Puncak Malam Hari.....	161
4.4 Hasil Simulasi Kontingensi Pada Sistem Kelistrikan sulbagsel.....	173
4.4.1 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Andowia-Bungku.....	175
4.4.1.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku Secara Bergantian (N-1).....	175
4.4.1.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku Secara Bersamaan (N-2).....	178
4.4.2 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap.....	184
4.4.2.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap Secara Bergantian (N-1).....	185
4.4.2.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap Secara Bersamaan (N-2).....	188
4.4.3 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa.....	192
4.4.3.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa Secara Bergantian (N-1).....	192
4.4.3.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa Secara Bersamaan (N-2).....	195
4.4.4 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Kendari-Andowia.....	198
4.4.4.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia Secara Bergantian (N-1).....	199
4.4.4.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia Secara Bersamaan (N-2).....	202
4.4.5 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Punagaya-Bantaeng Switch.....	206
4.4.5.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Punagaya-Bantaeng Switch Secara Bergantian (N-1).....	207



4.4.5.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Punagaya-Bantaeng Switch Secara Bersamaan (N-2).....	210
4.4.6 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru.....	214
4.4.6.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru Secara Bergantian (N-1).....	214
4.4.6.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru Secara Bersamaan (N-2).....	217
4.4.7 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang.....	220
4.4.7.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang Secara Bergantian (N-1).....	220
4.4.7.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang Secara Bersamaan (N-2).....	223
4.4.8 Kontingensi Saluran Transmisi 500 kV Wotu-Bungku.....	226
4.4.8.1 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku Secara Bergantian (N-1).....	227
4.4.8.2 Simulasi Lepasnya Line 1 dan Line 2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku Secara Bersamaan (N-2).....	229
BAB V PENUTUP.....	234
5.1 Kesimpulan.....	234
5.2 Saran.....	235
DAFTAR PUSTAKA.....	236
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	8
Gambar 2.2 Sistem Tenaga Listrik Sulawesi.....	10
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen saluran transmisi jarak pendek.....	12
Gambar 2.4 Rangkaian nominal T saluran jarak menengah.....	13
Gambar 2.5 Rangkaian nominal PI saluran jarak menengah.....	15
Gambar 2.6 Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak Panjang.....	17
Gambar 3.1 <i>Single line diagram</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Menggunakan Transmisi 500 kV.....	28
Gambar 3.2 <i>Single line diagram</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Tanpa Transmisi 500 kV.....	29
Gambar 3.3 Diagram Alur Penelitian.....	55
Gambar 4.1 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Latuppa-Enrekang.....	60
Gambar 4.2 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Enrekang-Sidrap.....	60
Gambar 4.3 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Sidrap-Daya.....	61
Gambar 4.4 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Daya-Punagaya.....	61
Gambar 4.5 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Punagaya-Bantaeng Switch..	62
Gambar 4.6 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Wotu-Bungku.....	62
Gambar 4.7 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Bungku-Andowia.....	63
Gambar 4.8 <i>Single line diagram</i> Transmisi 500 kV Andowia-Kendari.....	63
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Kondisi Beban Puncak Siang dan Malam Untuk <i>Variation</i> Satu.....	68
Gambar 4.10 Warna <i>Single line diagram</i> Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk <i>Variation</i> Satu Berdasarkan Area Layanan.....	73
Gambar 4.11 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Jeneponto Untuk <i>Variation</i> Satu.....	74
Gambar 4.12 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Kendari Untuk <i>Variation</i> Satu.....	76
Gambar 4.13 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Mamuju Untuk <i>Variation</i> Satu.....	77



Gambar 4.14 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Maros Untuk *Variation* Satu.....79

Gambar 4.15 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Palopo Untuk *Variation* Satu.....81

Gambar 4.16 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Palu Untuk *Variation* Satu.83

Gambar 4.17 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Panakukang Untuk *Variation* Satu.....84

Gambar 4.18 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Parepare Untuk *Variation* Satu.....86

Gambar 4.19 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Sidrap Untuk *Variation* Satu.....87

Gambar 4.20 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Watampone Untuk *Variation* Satu.....88

Gambar 4.21 Grafik Tegangan Bus Pada Seluruh Area ULTG PT. PLN Untuk *Variation* Satu.....90

Gambar 4.22 Grafik Tegangan Bus Milik milik *Independent Power Plan* (IPP) dan Perseroan Terbatas (PT) Untuk *Variation* Satu.....91

Gambar 4.23 Arah Aliran Daya & Arus Pada *Single line diagram Variation* Satu Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Siang Hari.....94

Gambar 4.24 Arah Aliran Daya & Arus Pada *Single line diagram Variation* Satu Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Malam Hari.....95

Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Kondisi Beban Puncak Siang dan Malam Untuk *Variation* Dua.....102

Gambar 4.26 Grafik Tegangan Bus 500 kV Dalam Kondisi Beban Puncak Siang Hari dan Malam Hari.....106

Gambar 4.27 Warna *Single line diagram* Sistem Kelistrikan Sulbagsel Untuk *Variation* Dua Berdasarkan Area Layanan.....108

Gambar 4.28 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Jenepono Untuk *Variation* Dua.....109



Gambar 4.29 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Kendari Untuk *Variation* Dua.....111

Gambar 4.30 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Mamuju Untuk *Variation* Dua.....112

Gambar 4.31 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Maros Untuk *Variation* Dua.....114

Gambar 4.32 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Palopo Untuk *Variation* Dua.....115

Gambar 4.33 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Palu Untuk *Variation* Dua.....117

Gambar 4.34 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Panakukang Untuk *Variation* Dua.....118

Gambar 4.35 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Parepare Untuk *Variation* Dua.....120

Gambar 4.36 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Sidrap Untuk *Variation* Dua.....121

Gambar 4.37 Grafik Tegangan Bus Pada Area ULTG Watampone Untuk *Variation* Dua.....122

Gambar 4.38 Grafik Tegangan Bus Pada Seluruh Area ULTG PT. PLN Untuk *Variation* Dua.....124

Gambar 4.39 Grafik Tegangan Bus Milik *Independent Power Plan* (IPP) dan Perseroan Terbatas (PT) Untuk *Variation* Dua.....125

Gambar 4.40 Arah Aliran Daya & Arus Pada *Single line diagram Variation* Dua Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Siang Hari.....127

Gambar 4.41 Arah Aliran Daya & Arus Pada *Single line diagram Variation* Dua Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Malam Hari.....128

Gambar 4.42 Grafik Perbandingan Daya *Generation, Load, & Grid Losses* Pada SLD *Variation* Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Siang Hari.....133



Gambar 4.43 Grafik Perbandingan Daya Reaktif Dari Fenomena <i>Line Charging</i> & Kompensasi Kapasitor Bank Pada SLD <i>Variation</i> Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Siang Hari.....	137
Gambar 4.44 Grafik Perbandingan Daya Aktif Dari <i>Installed Capacity</i> & <i>Spinning Reserve</i> Pada SLD <i>Variation</i> Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Siang Hari.....	139
Gambar 4.45 Grafik Perbandingan Daya <i>Generation</i> , <i>Load</i> , & <i>Grid Losses</i> Pada SLD <i>Variation</i> Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Malam Hari.....	142
Gambar 4.46 Grafik Perbandingan Daya Reaktif Dari Fenomena <i>Line Charging</i> & Kompensasi Kapasitor Bank Pada SLD <i>Variation</i> Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Malam Hari.....	146
Gambar 4.47 Grafik Perbandingan Daya Aktif Dari <i>Installed Capacity</i> & <i>Spinning Reserve</i> Pada SLD <i>Variation</i> Satu & Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Malam Hari.....	148
Gambar 4.48 Grafik Perbandingan Antara Tegangan Bus Milik PT. PLN Dalam SLD <i>Variation</i> Satu Dengan Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Siang Hari.....	150
Gambar 4.49 Grafik Perbandingan Antara Tegangan Bus Milik IPP & Swasta Dalam SLD <i>Variation</i> Satu Dengan Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Siang Hari.....	154
Gambar 4.50 Tampilan <i>Single line diagram Variation</i> Satu Setelah Simulasi <i>Load flow</i> Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Siang Hari.....	157
Gambar 4.51 Tampilan <i>Single line diagram Variation</i> Dua Setelah Simulasi <i>Load flow</i> Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Siang Hari.....	158
Gambar 4.52 Grafik Perbandingan Antara Tegangan Bus Milik PT. PLN Dalam SLD <i>Variation</i> Satu Dengan Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Malam Hari.....	162
Gambar 4.53 Grafik Perbandingan Antara Tegangan Bus Milik IPP & Swasta Dalam SLD <i>Variation</i> Satu Dengan Dua Yang Beroperasi Di Beban Puncak Malam Hari.....	167



Gambar 4.54 Tampilan *Single line diagram Variation* Satu Setelah Simulasi *Load flow* Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Malam Hari.....169

Gambar 4.55 Tampilan *Single line diagram Variation* Dua Setelah Simulasi *Load flow* Saat Sistem Kelistrikan Sulbagsel Beroperasi Dalam Keadaan Beban Puncak Di Malam Hari.....170

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi 70 kV.....	30
Tabel 3.2 Data Saluran Transmisi 150 kV.....	30
Tabel 3.3 Data Saluran Transmisi 275 kV.....	35
Tabel 3.4 Data Saluran Transmisi 500 kV.....	36
Tabel 3.5 Data Pembangkit Untuk Beban Puncak Siang.....	37
Tabel 3.6 Data Pembangkit Untuk Beban Puncak Malam.....	39
Tabel 3.7 Data Transformator Generator.....	41
Tabel 3.8 Data Transformator IBT.....	43
Tabel 3.9 Data Transformator Daya.....	44
Tabel 3.10 Data Beban Puncak Siang Hari.....	47
Tabel 3.11 Data Beban Puncak Malam Hari.....	51
Tabel 4.1 <i>Total System Summary</i> Simulasi <i>Load flow Variation</i> Satu Saat Beban Puncak Siang dan Malam.....	65
Tabel 4.2 <i>Total System Summary</i> Simulasi <i>Load flow Variation</i> Dua Saat Beban Puncak Siang dan Malam.....	97
Tabel 4.3 Tegangan Bus 500 kV.....	105
Tabel 4.4 Perbedaan <i>Total System Summary Variation</i> Satu & Dua Saat Beban Puncak Siang Hari.....	132
Tabel 4.5 Perbedaan <i>Total System Summary Variation</i> Satu & Dua Saat Beban Puncak Malam Hari.....	141
Tabel 4.6 Daftar Saluran Transmisi 500 kV Yang Di Kontingensi Dengan Kasus N-1 & N-2 Saat Beban Puncak Siang dan Malam Hari.....	174
Tabel 4.7 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	176
Tabel 4.8 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	177
Tabel 4.9 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	179
Tabel 4.10 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku: <i>Minimum Voltages</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	179



Tabel 4.11 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....181

Tabel 4.12 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Andowia-Bungku:
Minimum Voltages Saat Beban Puncak Malam Hari.....182

Tabel 4.13 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....185

Tabel 4.14 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....186

Tabel 4.15 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....189

Tabel 4.16 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Minimum Voltages Saat Beban Puncak Siang Hari.....189

Tabel 4.17 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....190

Tabel 4.18 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Daya Baru-Sidrap:
Minimum Voltages Saat Beban Puncak Malam Hari.....190

Tabel 4.19 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....193

Tabel 4.20 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....194

Tabel 4.21 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....196

Tabel 4.22 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Enrekang-Latuppa:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....197

Tabel 4.23 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....199

Tabel 4.24 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....200

Tabel 4.25 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....202



Tabel 4.26 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia: <i>Minimum Voltages</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	203
Tabel 4.27 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	204
Tabel 4.28 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Kendari-Andowia: <i>Minimum Voltages</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	204
Tabel 4.29 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	207
Tabel 4.30 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	208
Tabel 4.31 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	210
Tabel 4.32 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Minimum Voltages</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	211
Tabel 4.33 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	212
Tabel 4.34 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya- Bantaeng Switch: <i>Minimum Voltages</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	212
Tabel 4.34 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	215
Tabel 4.35 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	216
Tabel 4.36 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	218
Tabel 4.37 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Punagaya-Daya Baru: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	219
Tabel 4.38 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Siang Hari.....	221
Tabel 4.39 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang: <i>Maximum Loading</i> Saat Beban Puncak Malam Hari.....	222



Tabel 4.40 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....224

Tabel 4.41 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Sidrap-Enrekang:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....225

Tabel 4.42 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....227

Tabel 4.43 Laporan Analisis Kontingensi N-1 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....228

Tabel 4.44 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Siang Hari.....230

Tabel 4.45 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Minimum Voltages Saat Beban Puncak Siang Hari.....230

Tabel 4.46 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Maximum Loading Saat Beban Puncak Malam Hari.....231

Tabel 4.47 Laporan Analisis Kontingensi N-2 Transmisi 500 kV Wotu-Bungku:
Minimum Voltages Saat Beban Puncak Malam Hari.....232



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada masa sekarang energi listrik sudah menjadi kebutuhan pokok bagi seluruh kalangan masyarakat, mulai dari pemerintahan, pendidikan, kesehatan, rumah tangga, dan lain-lain. Semua kegiatan tersebut tidak akan dapat berjalan normal tanpa adanya energi listrik. Karena disebabkan oleh penambahan jumlah penduduk, pertumbuhan ekonomi, serta pola konsumsi energi yang terus meningkat. Sehingga kondisi tersebut membuat jumlah konsumsi energi listrik meningkat dari tahun ke tahun.

Untuk mengatasi naiknya kebutuhan akan energi listrik, maka pemerintah Indonesia memprogramkan 35.000 MW. Hal ini merupakan program pembangunan ketenagalistrikan 35.000 MW yang meliputi pengembangan pembangkit, jaringan transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi. Sesuai kebijakan pemerintah untuk mewujudkan program 35.000 MW yaitu Peraturan Presiden Nomor 4 Tahun 2016 dan telah diubah dengan Peraturan Presiden Nomor 14 tahun 2017 tentang Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan. Sehingga PLN sebagai badan usaha milik negara, yang mengurus ketenagalistrikan harus mewujudkan program tersebut sebagaimana yang tercantum di perpres (PT. PLN (Persero), 2019). PLN berkewajiban menyediakan energi listrik dalam jumlah yang cukup kepada masyarakat di seluruh Indonesia secara terus menerus, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Dengan demikian PLN harus mampu melayani kebutuhan energi listrik saat ini maupun di masa yang akan datang. Penyediaan tenaga listrik dilakukan dengan merencanakan penambahan pembangkit, transmisi, dan GI serta distribusi yang tertuang dalam dokumen RUPTL. RUPTL ini disusun untuk mempercepat peningkatan rasio elektrifikasi dengan menyambung konsumen baru dalam jumlah yang cukup tinggi setiap tahun.

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) adalah rencana yang dibuat oleh pemerintah melalui PLN sebagai pedoman pembangunan kelistrikan 10 tahun kedepan. Sesuai Peraturan Presiden No. 22 tahun 2017 tentang Rencana

Umum Energi Nasional (RUEN) diundangkan pada tanggal 13 Maret 2017. Prepres RUEN disusun oleh pemerintah sebagai landasan untuk menyusun rencana-rencana teknis, seperti halnya Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) oleh PLN (Hestikah Eirene Patoding Matius, 2019). RUPTL digunakan untuk membuat sistem kelistrikan di Indonesia. Di mana RUPTL merupakan rencana pengupdetan dari sistem tenaga listrik Indonesia akibat penambahan beban dari tahun ke tahun.

Sulawesi merupakan pulau yang berada di bagian Timur Indonesia. Di Regional Sulawesi terdapat dua sistem Interkoneksi yang cukup besar yaitu Sistem Sulbagut dan Sistem Sulbagsel dengan menggunakan level tegangan 275 kV, 150 kV, dan 70 kV. Naiknya kebutuhan akan energi listrik juga terjadi di Sulawesi khususnya di Sistem Sulawesi bagian Selatan (Sulbagsel), di mana Sistem Sulbagsel merupakan penggabungan Sistem Sulsel-Sulbar, Sistem Sulteng, dan Sistem Sultra. Kebutuhan tenaga listrik pada daerah ini didorong oleh beberapa faktor utama yaitu pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Yang membuat naiknya permintaan barang-barang atau peralatan listrik. Berdasarkan RUPTL PLN pada Sistem Sulbagsel, potensi beban terutama industri besar diperkirakan akan dibangun di Sulawesi Tenggara, Makassar, dan sekitarnya sebagai pusat beban, dan diperkirakan masih akan tumbuh tinggi. Sehingga untuk menyalurkan energi listrik dalam jumlah yang sangat besar, perlunya dibangun transmisi tegangan ekstra tinggi (EHV) sebagai *backbone*. Sesuai dengan hasil kajian Masterplan Kelistrikan Sulawesi, tegangan transmisi yang akan digunakan sebagai transmisi *backbone* adalah tegangan 500 kV (PT. PLN (Persero), 2019).

Pengembangan transmisi 500 kV di Sulawesi pada umumnya dibangun untuk membentuk *backbone* transmisi yang menyalurkan energi dalam jumlah besar ke pusat beban yang lokasinya sangat berjauhan dan untuk menghubungkan antar sistem menjadi sistem yang lebih besar. Selain itu pengembangan transmisi tersebut untuk melayani kebutuhan beban di ibukota Provinsi, Kabupaten, dan Kota yang memerlukan keandalan tinggi. Transmisi tegangan ekstra tinggi tersebut direncanakan dari Palopo sampai Jeneponto melalui Enrekang, Sidrap, dan Daya baru/Maros. Serta dari Wotu sampai Kendari melalui Bungku dan Andowia (PT. PLN (Persero), 2019). Proyek pengembangan transmisi tersebut seiring dengan

pengembangan proyek PLTA skala besar pada sistem Sulbagsel yang terletak disekitar perbatasan Sulsel, Sulbar, dan Sulteng. Hal ini disebabkan potensi beban terutama industri besar pengolahan mineral/tambang diperkirakan akan banyak dibangun di Sulawesi Tenggara sebagai sumber utama bahan mentah mineral seperti nikel, juga Makassar dan sekitarnya sebagai pusat beban (PT. PLN (Persero), 2019). Sedangkan jarak antara PLTA skala besar dan beban sangat berjauhan, maka dari itu pengembangan transmisi tegangan ekstra tinggi sebagai *backbone* diperlukan.

Pengembangan transmisi 500 kV akan membuat sistem kelistrikan memerlukan analisa aliran daya dan analisa kontingensi ulang agar sistem kelistrikan menjadi handal, efisien, dan optimal. Analisis pada aliran daya berguna dalam perencanaan dan pengembangan pada suatu sistem. Hasil dari analisa perhitungan dapat membuat diketahuinya tegangan dan sudut fasa pada masing-masing bus, faktor daya pada setiap percabangan, mengetahui kemampuan peralatan mengalirkan daya yang diinginkan, baik aliran daya aktif dan daya reaktif pada sistem kelistrikan Sulbagsel (Erwin Ramadhani, 2018). Dan untuk analisis kontingensi yang merupakan studi pelepasan elemen jaringan yang disebabkan lepasnya saluran transmisi atau generator. Di mana dengan melakukan analisis kontingensi dapat mengetahui karakteristik perubahan aliran daya akibat pembangkit atau transmisi yang mengalami gangguan pada sistem tenaga listrik. Sebab dalam pengengoperasian jaringan transmisi tidak lepas dari suatu gangguan, adapun jenis gangguan pada transmisi dapat bersifat permanen atau sementara. Dan apakah gangguan tersebut dapat merusak atau mempengaruhi sistem aliran daya pada saluran. Yang mana hal tersebut akan menyebabkan kerugian finansial (Syafaat Ma'ruf, 2018). Dengan demikian pada tugas akhir ini dilakukan analisis mengenai aliran daya dan kontingensi pada sistem kelistrikan Sulbagsel akibat penambahan transmisi 500 kV AC, sehingga diangkat judul penelitian **“Studi Aliran Daya Dan Kontingensi Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Dengan Penambahan Transmisi 500 kV”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan jalur *single line diagram* saluran transmisi 500 kV yang diinterkoneksi ke dalam sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan.
2. Bagaimana aliran daya pada Sistem Sulawesi Bagian Selatan sebelum penambahan dan setelah penambahan transmisi 500 kV.
3. Bagaimana pengaruh dari kontingensi terhadap saluran transmisi 500 kV dalam sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan yang telah diinterkoneksi.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan model jalur *single line diagram* saluran transmisi 500 kV yang diinterkoneksi ke dalam sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan.
2. Mengetahui hasil simulasi aliran daya pada sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan sebelum dan setelah penambahan saluran transmisi.
3. Melihat perbedaan tegangan setiap bus/rel dan arah aliran daya antara sistem Sulawesi Bagian Selatan yang belum dan yang sudah ditambahkan transmisi 500 kV.
4. Mengetahui dampak yang timbul akibat studi kontingensi terhadap satu persatu saluran transmisi 500 kV dari sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan setelah penambahan transmisi tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini membatasi masalah guna mengoptimalkan hasil penelitian. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Sistem kelistrikan Sistem Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) menggunakan saluran transmisi 500 kV sebagai *backbone* dalam menyalurkan daya dalam jumlah besar ke pusat beban.
2. Data yang digunakan berdasarkan RUPTL PT. PLN PERSERO tahun 2019-2028.

3. Penambahan transmisi 500 kV pada sistem kelistrikan Sulbagsel berfokus pada pemodelan *single line diagram* pada *software* power factory DigSILENT 15.1 dan data yang dibutuhkan *single line diagram* tersebut.
4. Perhitungan aliran daya dan analisis kontingensi menggunakan metode Newton Raphson yang diterapkan dalam *software* power factory DigSILENT 15.1.
5. Untuk studi kontingensi sistem kelistrikan Sulbagsel setelah penambahan transmisi 500 kV berfokus pada perubahan nilai arus, tegangan, dan daya pada masing-masing bus dan saluran setelah kontingensi. Dan tidak membahas penanggulangan terhadap perubahan yang timbul akibat studi kontingensi tersebut.

1.6 Metode Penelitian

Metode yang akan dilakukan untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Studi Literatur

Studi literatur adalah kajian penulis atas referensi-referensi yang ada baik berupa buku, karya-karya ilmiah, internet, maupun melalui media massa yang berhubungan dengan penulisan laporan penelitian ini.

2. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data berdasarkan RUPTL tahun 2019-2028 pada sistem kelistrikan Sulbagsel berupa parameter-parameter yang nilainya digunakan sebagai masukan dalam pembuatan *single line diagram* sistem kelistrikan Sulbagsel.

3. Pemodelan sistem dan simulasi

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* sistem kelistrikan Sulbagsel dengan *software* power factory DigSILENT 15.1. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya dan kontingensi.

4. Analisis aliran daya dan kontingensi

Setelah melakukan simulasi aliran daya dan kontingensi maka dilakukan proses menganalisa untuk mengetahui pengaruh penambahan saluran transmisi 500 kV pada sistem kelistrikan Sulbagsel sesuai RUPTL PLN 2019-2028.

5. Penarikan Kesimpulan



Diperoleh setelah dilakukan korelasi antara hasil pengolahan dengan permasalahan yang diteliti. Simpulan ini merupakan hasil akhir dari semua masalah yang dibahas.

1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir

Pembahasan tugas akhir ini memiliki susunan sebagai berikut:

1. **BAB I PENDAHULUAN**

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

2. **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang teori penunjang yang relevan untuk bahan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

3. **BAB III DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

4. **BAB IV HASIL DAN ANALISA**

Pada bab ini akan berisi tentang hasil dan pembahasan yang telah didapatkan dari hasil penelitian.

5. **BAB V PENUTUP**

Pada bab ini akan berisi tentang kesimpulan dan saran dari keseluruhan proses penelitian yang telah dilakukan.

6. **DAFTAR PUSTAKA**

Berisi tentang referensi-referensi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir.

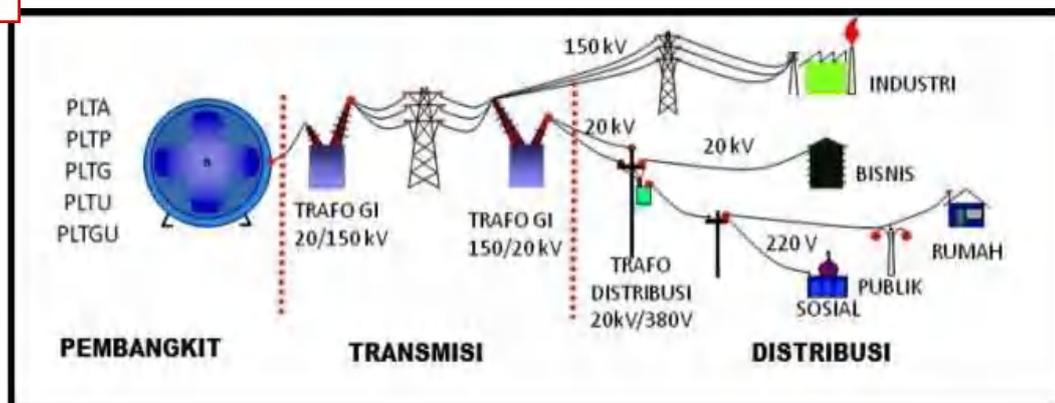
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Tenaga listrik merupakan bentuk energi sekunder yang dibangkitkan, ditransmisikan, dan didistribusikan kepada pelanggan atau konsumen dan dimanfaatkan untuk segala macam keperluan. Yang mana untuk menyalurkan tenaga listrik membutuhkan sebuah sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik secara umum merupakan suatu sistem yang terdiri dari lima sub sistem utama yaitu pembangkit listrik, sistem transmisi, gardu induk, sistem distribusi, dan beban (Sigi Syah Wibowo, 2018). Sistem ini saling terintegrasi dan berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik bagi semua orang.

Diketahui energi listrik berasal dari pembangkit tenaga listrik. Lokasi pembangkit tenaga listrik umumnya berada jauh dari sumber beban, sehingga untuk menyalurkan energi listrik yang telah dibangkitkan harus disalurkan melalui sistem transmisi. Energi listrik yang dibangkitkan, tegangannya akan dinaikkan menggunakan transformator penaik tegangan (*step up transformer*) untuk kemudian disalurkan melalui sistem transmisi menuju gardu induk yang kemudian dapat disalurkan ke beban. Tegangan ini dinaikkan dengan maksud untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Setelah daya listrik yang disalurkan mendekati sumber beban atau gardu induk, maka selanjutnya tegangan transmisi diturunkan melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*) di gardu induk tersebut. Tegangan diturunkan menjadi tegangan menengah 20 kV untuk dapat disalurkan ke gardu distribusi. Kemudian di gardu distribusi tegangan kembali diturunkan menjadi tegangan rendah 220 V/380 V, sehingga selanjutnya dapat disalurkan melalui saluran distribusi menuju pusat pusat beban. Pada Gambar 2.1 berikut ini merupakan ilustrasi komponen sistem tenaga listrik secara umum (Sigi Syah Wibowo, 2018).



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik (Sigi Syah Wibowo, 2018)

Berikut ini penjelasan mengenai bagian utama pada sistem tenaga listrik pada umumnya, yaitu:

1. Pusat Pembangkit

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, di mana terdapat turbin sebagai penggerak awal (*Prime Mover*) dan generator yang membangkitkan listrik dengan mengubah tenaga turbin (energi kinetik) menjadi energi listrik. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain: transformator, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (6 kV-24 kV) menjadi tegangan transmisi atau tegangan tinggi dan juga peralatan pengaman dan pengatur.

2. Jaringan Transmisi

Pada umumnya sistem pembangkitan jauh dari tempat-tempat di mana energi listrik tersebut digunakan. Karenanya energi listrik yang dibangkitkan itu harus disalurkan melalui saluran transmisi. Disebabkan tegangan generator umumnya rendah, antara 6 kV sampai 24 kV, maka tegangan tersebut harus dinaikkan oleh transformator daya yang ada (*step up* transformator) dengan pertimbangan ekonomis.

3. Gardu Induk

Gardu induk sebagai salah satu bagian sistem tenaga listrik memegang peranan yang sangat penting, karena merupakan terminal terhadap pelayanan tenaga listrik ke konsumen. Peranan dari gardu induk itu sendiri adalah

menerima dan menyalurkan tenaga listrik sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu (TET, TT dan TM) (Dian Saefulloh, 2013). Secara umum fungsi gardu induk yang pertama adalah mentransformasi tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya dan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya, dan yang kedua berfungsi melakukan pengukuran, pengawasan operasi serta pengaturan pengamanan dari sistem tenaga listrik.

4. Jaringan Distribusi

Sistem distribusi ini adalah sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pengguna listrik dan pada umumnya berfungsi dalam hal penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Pada dasarnya jaringan distribusi mirip dengan jaringan transmisi, yaitu jaringan sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik melalui konduktor-konduktor (kawat), yang membedakan hanyalah bahwa jaringan distribusi adalah jaringan transmisi energi listrik yang lebih ke hilir (konsumen) (Nurul Khaerunnisa Hasmudi, 2020).

5. Beban

Beban listrik merupakan peralatan listrik yang terletak di konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut. Dalam sistem tenaga listrik beban dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu:

- a. Beban resistif
- b. Beban kapasitif
- c. Beban induktif

Dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, beban tidak diberikan secara lengkap, untuk merepresentasikan suatu beban dari suatu sistem tenaga listrik ($P+jQ$), sangat penting untuk mengetahui variasi daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) terhadap variasi tegangannya (Syafaat Ma'ruf, 2018).

sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Utara, dan juga sistem kelistrikan Sulbagsel atau biasa disebut sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan. Sistem Sulbagsel merupakan penggabungan dari sistem Sulawesi Selatan, sistem Sulawesi Barat, sistem Sulawesi Tengah, dan sistem Sulawesi Tenggara. Sistem interkoneksi tersebut dipasok dari PLTU, PLTA, PLTG/GU/MG, PLTD, PLTMH, dan PLTB (PT. PLN (Persero), 2019).

2.2 Saluran Transmisi

Sistem transmisi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari pembangkit menuju pusat-pusat beban. Saluran transmisi yang saling terinterkoneksi satu dengan lainnya bukan hanya untuk keperluan penyaluran daya listrik dalam suatu regional, tetapi juga untuk keperluan transfer daya antara regional dalam kondisi darurat (Syafaat Ma'ruf, 2018). Selain itu saluran transmisi digunakan untuk menghubungkan antar busbar satu dengan busbar lain (Karina Eka Santi, 2018). Pada sistem tenaga listrik saluran transmisi dibedakan berdasarkan level tegangan, yaitu:

1. Tegangan Tinggi berada pada level tegangan 35 kV- 150 kV
2. Tegangan Ekstra Tinggi berada pada level tegangan 200 kV- 765 kV
3. Tegangan Ultra Tinggi berada pada level tegangan >765 kV

Penyaluran tenaga listrik pada transmisi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu; transmisi menggunakan arus bolak-balik (AC) ataupun transmisi yang menggunakan arus searah (DC). Saluran transmisi yang menggunakan sistem arus bolak-balik tiga fasa merupakan sistem yang banyak digunakan, mengingat kelebihanannya sebagai berikut:

1. Mudah pembangkitannya.
2. Mudah merubah tegangannya.
3. Dapat menghasilkan medan magnet putar.
4. Dengan sistem tiga fasa, daya yang disalurkan lebih besar dan nilai sesaatnya konstan.

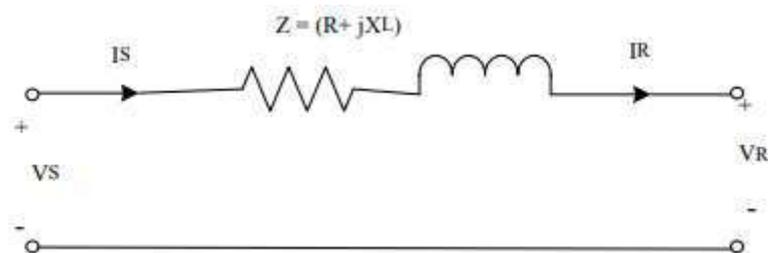
Saluran transmisi listrik yang menggunakan arus bolak balik (AC) mempunyai empat parameter yang memengaruhi kemampuannya untuk

menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban. Keempat parameter tersebut adalah resistansi (R), induktansi (L), kapasitansi (C), dan konduktansi (G) (Sakinah, 2016). Induktansi dan kapasitansi memiliki pengaruh medan magnet dan medan listrik disekitar konduktor. Parameter-parameter ini sangat penting untuk pengembangan model saluran transmisi yang digunakan dalam analisa sistem tenaga. Besar kecilnya parameter-parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, jenis konduktor yang digunakan, jenis konfigurasi yang dibangun, temperatur sekitar, dan jarak saluran. Dalam saluran transmisi juga dijumpai fenomena-fenomena kelistrikan seperti rugi daya, rugi tegangan, *under voltage* dan *over voltage*, yang semuanya sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter sebagaimana disebutkan diatas.

Energi listrik dapat disalurkan melalui dua cara yaitu melalui transmisi saluran udara (*overhead line*) dan transmisi saluran bawah tanah (*underground line*). Saluran udara menyalurkan daya listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada menara transmisi melalui perantara isolator. Dan saluran bawah tanah menyalurkan daya listrik melalui kabel yang ditanam atau diletakkan dalam saluran bawah tanah (Budiono Mismail, 2011).

2.2.1 Saluran Transmisi Pendek

Pada saluran transmisi pendek (*short line*) memiliki Panjang <80 km (di bawah 50 mil). Pada saluran model ini besar kapasitansi ke tanah sangat kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan. Rangkain ekivalen salutan transmisi jarak pendek dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen saluran transmisi jarak pendek (Syafaat Ma'ruf, 2018)

Konstanta ABCD Saluran Pendek (Syafaat Ma'ruf, 2018)

$$V_S = V_R + Z I_R \quad 2.1$$

$$I_S = I_R \quad 2.2$$

Dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad 2.3$$

Di mana:

$$A = 1$$

$$B = Z$$

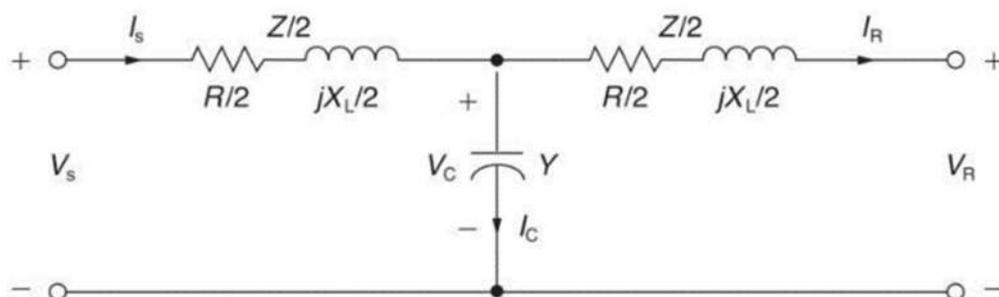
$$C = 0$$

$$D = 1$$

2.2.2 Saluran Transmisi Menengah

Pada saluran transmisi menengah adalah saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 80 km (50 mil) sampai dengan 250 km (150 mil). Nilai kapasitansi pada saluran menengah relatif cukup besar, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan. Sehingga seluruh admitansi shunt saluran terpusat pada cabang shunt, di mana pada saluran transmisi menengah dibedakan menjadi dua model, yaitu:

1. Saluran transmisi menengah nominal T yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada satu titik dan impedansi serinya terbagi dua pada kedua cabang serinya.



Gambar 2.4 Rangkaian nominal T saluran jarak menengah (Syafaat Ma'ruf, 2018)



Dari gambar di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_S = V_R + I_R \frac{Z}{2} + I_S \frac{Z}{2} \quad 2.4$$

$$I_S = I_R + V_P Y \quad 2.5$$

$$V_P = V_R + I_R \frac{Z}{2} \quad 2.6$$

Substitusikan Persamaan 2.6 ke Persamaan 2.5, sehingga didapatkan:

$$I_S = I_R + (V_R + I_R \frac{Z}{2}) Y$$

$$I_S = Y V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \quad 2.7$$

Substitusikan Persamaan 2.7 ke Persamaan 2.4, sehingga didapatkan:

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + (Z + \frac{Z^2 Y}{4}) I_R \quad 2.8$$

Maka konstanta ABCD saluran menengah nominal T (Syafaat Ma'ruf, 2018)

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + (Z + \frac{Z^2 Y}{4}) I_R \quad 2.8$$

$$I_S = Y V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \quad 2.7$$

Dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z + \frac{Z^2 Y}{4} \\ Y & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad 2.9$$

Di mana:

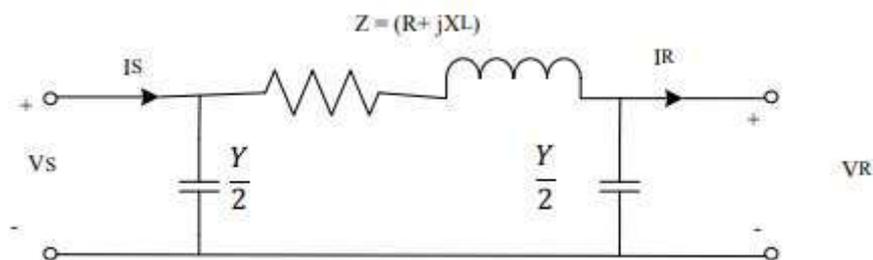
$$A = 1 + \frac{ZY}{2}$$

$$B = 1 + \frac{ZY}{4}$$

$$C = Y$$

$$D = 1 + \frac{ZY}{2}$$

2. Saluran transmisi menengah nominal PI (π) yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada dua titik dan impedansi serinya dipusatkan satu titik pada cabang serinya.



Gambar 2.5 Rangkaian nominal PI saluran jarak menengah (Syafaat Ma'ruf, 2018)

Dari gambar di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_S = V_R + I_P Z \tag{2.10}$$

$$I_P = I_R + V_R \frac{Y}{2} \tag{2.11}$$

$$I_S = I_P + V_S \frac{Y}{2} \tag{2.12}$$

Substitusikan Persamaan 2.11 ke Persamaan 2.10, sehingga didapatkan:

$$V_S = V_R + (I_R + V_R \frac{Y}{2}) Z$$

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \tag{2.13}$$

Substitusikan Persamaan 2.11 & Persamaan 2.13 ke Persamaan 2.12, sehingga didapatkan:

$$I_S = I_R + V_R \frac{Y}{2} + \left(\left(1 + \frac{ZY}{2} \right) V_R + Z I_R \right) \frac{Y}{2}$$

$$I_S = \left(Y + \frac{ZY^2}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) I_R \quad 2.14$$

Maka konstanta ABCD saluran menengah nominal PI (Syafaat Ma'ruf, 2018)

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) V_R + Z I_R \quad 2.13$$

$$I_S = \left(Y + \frac{ZY^2}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) I_R \quad 2.14$$

Dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y + \frac{ZY^2}{4} & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad 2.15$$

Di mana:

$$A = 1 + \frac{ZY}{2}$$

$$B = Z$$

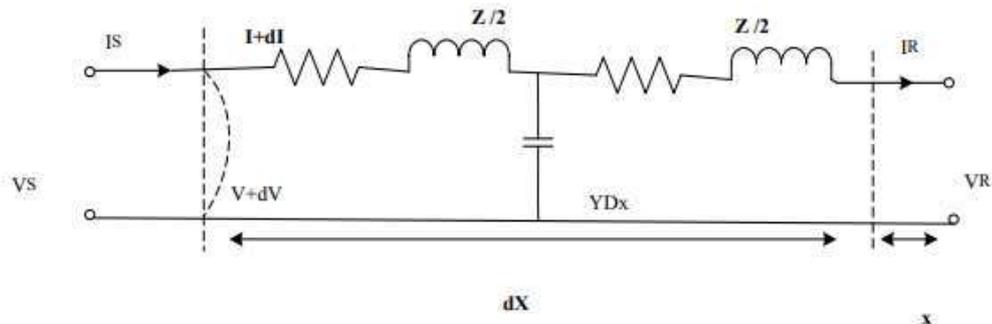
$$C = Y + \frac{ZY^2}{4}$$

$$D = 1 + \frac{ZY}{2}$$

2.2.3 Saluran Transmisi Panjang

Pada saluran transmisi panjang adalah saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 250 km (150 mile). Rangkaian T-Nominal dan Pi-Nominal tidak dapat menjelaskan saluran transmisi panjang dengan tepat. Perbedaan kedua rangkaian ekuivalen tersebut dengan saluran transmisi yang sebenarnya menjadi sangat besar. Tetapi masih mungkin untuk mendapatkan rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi panjang dengan merepresentasikannya secara tepat dengan

Jaringan parameter terpusat, asal pengukuran-pengukuran hasilnya dilakukan pada ujung-ujung saluran.



Gambar 2.6 Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak panjang (Syafaat Ma'ruf, 2018)

Konstanta ABCD saluran panjang (Syafaat Ma'ruf, 2018)

Bentuk matriks,

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad 2.16$$

Di mana:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad 2.17$$

Sehingga rumus mencari $\cosh(\gamma l)$ dan $\sinh(\gamma l)$ adalah:

$$\cosh(\alpha + j\beta) = \cosh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \sinh(\alpha l) \sin(\beta l) \quad 2.18$$

$$\sinh(\alpha + j\beta) = \sinh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l) \quad 2.19$$

2.3 Daya

Daya memiliki arti sebagai energi per satuan waktu. Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha di dalam sistem tenaga listrik. Menurut Kamus Fisika, daya adalah laju usaha yang dilakukan atau laju perubahan energi, dengan satuan SI-nya (watt) yang setara dengan 1 joule per detik. Daya listrik merepresentasikan laju perubahan energi yang dihasilkan oleh sebuah perangkat listrik, dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Sebagai contoh sebuah

pemanas ruangan mengubah energi listrik menjadi energi panas (M. Kaanal Miska, 2015).

Daya pada suatu sistem arus bolak-balik (AC) dikenal dengan tiga macam yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya aktif adalah daya rata-rata yang ditransmisikan atau dikonsumsi oleh beban. Beberapa contoh dari daya aktif adalah energi panas, energi mekanik, dan cahaya yang mana daya aktif memiliki satuan berupa Watt. Untuk daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan oleh sistem tenaga listrik dalam keperluan magnetisasi. Daya ini diperlukan untuk membangkitkan fluks-fluks magnetik pada peralatan listrik dalam rangkaian. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, dan lain-lain. Daya reaktif dapat dicatu dari eksitasi mesin-mesin sinkron maupun statik kapasitor. Daya reaktif dapat terjadi karena induktansi atau kapasitansi yang diakibatkan komponen berbentuk kumparan sedangkan kapasitansi diakibatkan oleh kapasitor. Dan daya reaktif memiliki satuan berupa Volt Ampere Reaktif (VAR). Sedangkan daya semu merupakan hasil penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif, di mana daya semu memiliki satuan berupa Volt Ampere (VA) (M. Kaanal Miska, 2015).

2.4 Aliran Daya

Analisa aliran daya sangat penting dalam sistem transmisi tenaga listrik dikarenakan pada saat proses penyaluran tenaga listrik selalu terdapat *losses* daya, di mana *losses* daya merupakan masalah yang tidak dapat dihilangkan dari sistem ketenagalistrikan, oleh karenanya sebuah sistem tenaga listrik harus mampu meminimalisir hal tersebut untuk mengurangi kerugian biaya operasi pembangkitan. Yang mana studi aliran daya berguna untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi tunak. Informasi yang didapat sangat diperlukan dalam mengevaluasi kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan.

Selain itu analisa aliran daya pada sistem tenaga listrik merupakan analisa penting yang harus dilakukan untuk membantu melaksanakan kegiatan operasi sistem dan juga sebagai pertimbangan dalam perencanaan sistem tenaga listrik. Dalam analisa aliran daya sistem tenaga ada dua parameter yang menjadi tujuan analisa yaitu untuk mengetahui tegangan pada setiap bus dan untuk mengetahui

aliran daya pada setiap saluran transmisi. Dengan mengetahui parameter tersebut, maka besaran-besaran listrik seperti daya aktif, daya reaktif, daya semu, arus saluran, tegangan bus, dan sudut fasa juga dapat dihitung.

Analisa aliran daya merupakan studi yang penting dalam perencanaan dan desain perluasan sistem tenaga listrik, serta menentukan operasi terbaik pada jaringan yang sudah ada. Analisa aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa-masa yang akan datang. Seiring dengan bertambahnya konsumen akan kebutuhan tenaga listrik, maka akan selalu terjadi perubahan beban, perubahan unit-unit pembangkit, dan perubahan saluran transmisi (Nur Cahyo, 2018).

Adapun tujuan dilakukannya analisa aliran daya terhadap sistem tenaga listrik diantaranya adalah;

1. Untuk mengetahui besaran sudut dan tegangan di setiap bus.
2. Untuk mengevaluasi kemampuan semua peralatan yang terpasang pada sistem apakah masih dalam batasan kemampuan peralatan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Sebagai langkah awal untuk melakukan studi-studi analisa sistem tenaga selanjutnya, seperti studi hubung singkat, studi transiet, studi koordinasi proteksi dan studi kestabilan sistem (Syafaat Ma'ruf, 2018).

Bus merupakan salah satu komponen penting dalam sistem kelistrikan, di mana bus berfungsi sebagai penghubung antara sistem dan beban. Setiap bus dalam analisa aliran daya sistem tenaga dikelompokkan menjadi tiga tipe yaitu;

1. Load Bus

Load bus atau PQ bus merupakan bus yang terhubung dengan beban dengan ketentuan PQ dari beban bernilai tetap sedangkan untuk $|v|$ dan θ (sudut fasa) harus di cari.

2. Generator Bus

Generator Bus atau PV bus merupakan bus yang terhubung dengan generator dengan ketentuan P dan $|v|$ dari generator bernilai tetap sedangkan untuk θ (sudut fasa) dan Q (daya reaktif generator) harus di cari.

3. *Swing/Slack* Bus

Swing/Slack Bus merupakan bus yang terhubung dengan generator dengan ketentuan $|v|$ dan θ dari generator bernilai tetap sedangkan untuk P dan Q harus di cari (Karina Eka Santi, 2018).

Pada umumnya, perhitungan aliran daya diasumsikan sistem dalam keadaan seimbang. Data dan informasi yang didapatkan dari aliran daya berguna dalam merencanakan perluasan sistem tenaga listrik dan dalam menentukan operasi terbaik untuk sistem jaringan kelistrikan. Perencanaan sistem aliran daya listrik industri meliputi beban terpasang dan beban operasi pada industri tersebut, sehingga dapat diperhitungkan besarnya daya pada transformator yang dibutuhkan, jadi dengan perencanaan yang baik dan matang maka aliran daya listrik pada sistem tersebut dapat sesuai dengan kebutuhan pemakaian energi listrik, serta mengurangi terjadinya *losses*. Menentukan perencanaan operasi terbaik dari sistem aliran daya listrik meliputi pengontrolan alokasi daya reaktif yang optimal.

2.5 Kontingensi

Kontingensi merupakan suatu kejadian kegagalan pada suatu sistem tenaga yang diakibatkan oleh lepasnya salah satu atau lebih elemen sistem baik itu unit pembangkit atau saluran transmisi, istilah ini sangat berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga dalam melayani beban yang ada jika terjadi gangguan tiba-tiba pada salah satu elemennya. Untuk alasan kontingensi lah, lebih dari satu saluran digunakan untuk menyalurkan daya listrik ke beban, meski seluruh elemen sistem berada pada kondisi normal.

Analisis kontingensi adalah hal yang sangat perlu diperhitungkan pada suatu sistem tenaga listrik dikarenakan fungsinya sebagai penguji sistem keamanan dan sebagai tindak lanjut dari program *load flow* yang berguna untuk memperhitungkan berbagai kondisi yang akan terjadi di masa mendatang dengan melakukan banyak kontingensi. Analisis terhadap kegagalan yang mungkin terjadi sangat perlu dilakukan, dikarenakan untuk menentukan langkah-langkah pengoperasian sistem guna mengatasi terjadinya kasus-kasus yang akan dihasilkan dari kontingensi tersebut (Cahya Nanda Priyadi, 2018).



2.6 Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson merupakan salah satu cara yang dapat dipergunakan untuk menyelesaikan masalah studi aliran daya dan kontingensi. Metode ini dikembangkan dari Deret Taylor, yang berguna untuk menghitung suatu fungsi dengan dua variable atau lebih. Metode aliran daya Newton-Raphson dapat menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan pada setiap busnya dengan menggunakan suatu set persamaan non linier. Metode ini sangat cocok digunakan dalam permasalahan aliran daya khususnya untuk sistem tenaga yang cukup besar karena untuk mencapai nilai konvergensi ditempuh dalam waktu yang cukup singkat jika dibandingkan dengan metode aliran daya lainnya. Metode Newton Raphson memiliki keunggulan dalam perhitungan matematis daripada metode yang lainnya. Sistem tenaga listrik yang besar cocok menggunakan metode Newton-Raphson karena lebih efisien dan praktis (Erwin Ramadhani, 2018).

Analisis aliran daya digunakan untuk menghitung tegangan, arus, daya dan faktor daya yang ada pada titik bus jaringan listrik yang beroperasi normal. Persamaan aliran daya dapat dikerjakan dengan proses pengulangan (metode iterasi), dengan mengatur nilai-nilai asumsi untuk tegangan bus yang tidak diketahui, dan menghitung nilai baru untuk setiap tegangan pada bus, dari nilai asumsi bus yang lain. Untuk menyelesaikan analisis aliran daya digunakan metode Newton-Raphson. Seperti yang diketahui metode ini menerapkan deret Taylor untuk mendapatkan turunan persamaan matematika sebagai dasar perhitungan iterasi yang melibatkan penggunaan matriks jacobian, tahap pertama untuk melakukan analisis aliran daya dilakukan penomoran pada bus di mana untuk nomor satu sebagai *slack*, nomor dua sebagai generator, dan nol sebagai beban. Untuk menyelesaikan metode Newton-Raphson pada penyelesaian persamaan-persamaan aliran daya, maka diperlukan untuk mencari P_k dan Q_k menggunakan persamaan di bawah ini (Jr., Wiliam D Stevenson, 1984).

Untuk menerapkan metode Newton-Raphson pada penyelesaian persamaan-persamaan aliran beban, maka tegangan-tegangan bus/rel dan admitansi-admitansi saluran dinyatakan dalam bentuk polar atau bentuk siku-siku.



$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad 2.20$$

Di mana persamaan 2.20 didapatkan dari Persamaan 2.21 dan 2.22

$$P_k - jQ_k = V_k^* I_k \quad 2.21$$

Yang mana

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad 2.22$$

Uraikan Persamaan 2.20 ke dalam unsur-unsur nyata dan khayalnya dengan

$$V_k = |V_k| \angle -\delta_k \quad V_n = |V_n| \angle \delta_n \quad \text{dan} \quad Y_{kn} = |Y_{kn}| \angle \theta_{kn}$$

Kita mempunyai

$$P_k - jQ_k = |V_k| \angle -\delta_k \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| |V_n| \angle \theta_{kn} + \delta_n \quad 2.23$$

Menjadi

$$P_k - jQ_k = \sum_{n=1}^N |V_k| |V_n| |Y_{kn}| \angle \theta_{kn} + \delta_n - \delta_k \quad 2.24$$

Jadi

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.25$$

dan

$$Q_k = - \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.26$$

Persamaan 2.25 dan 2.26 membentuk persamaan aljabar nonlinear dengan variabel sendiri. Besarannya variabel dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fase dinyatakan dalam satuan radian. Persamaan 2.25 dan 2.26 dikembangkan dari deret Taylor seperti persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad 2.27$$

pada persamaan diatas dimulai pada bus dua disebabkan besar tegangan dan sudut tegangan pada bus satu disebut slack bus/bus referensi yang nilainya sudah ditetapkan, yang mana persamaan diatas berfungsi untuk mencari $\Delta \delta_k^{(0)}$ dan $\Delta |V_k^{(0)}|$ pada sebuah bus (Hadi Saadat, 1999). Di mana penyederhanaan dari Persamaan 2.27 dapat dituliskan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(k)} & J_2^{(k)} \\ J_3^{(k)} & J_4^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V^{(k)}| \end{bmatrix} \quad 2.28$$

menjadi

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V^{(k)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(k)} & J_2^{(k)} \\ J_3^{(k)} & J_4^{(k)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad 2.29$$

Tanda-tanda (k) menunjukkan bahwa nilai-nilai ini adalah perkiraan-perkiraan yang keberapa, yang biasanya dimulai dari (0) menunjukkan bahwa nilai-nilai ini adalah perkiraan-perkiraan pertama. Jacobian itu telah disekat-sekat untuk memperjelas adanya bermacam-macam jenis umum turunan parsial yang muncul



pada masing-masing submatriks. Unsur-unsur jacobian didapatkan dengan membuat turunan-turunan parsial dari Persamaan 2.25 dan 2.26 yang sehubungan dengan tegangan dan sudut tegangan. Sehingga didapatkan

Elemen-elemen diagonal dari J_1 adalah

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.30$$

Elemen-elemen off-diagonal dari J_1 adalah

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = -|V_k V_n Y_{kn}| \sin (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad n \neq k \quad 2.31$$

Elemen-elemen diagonal dari J_2 adalah

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|V_k| |Y_{kk}| \cos \theta_{kk} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N |V_n Y_{kn}| \cos (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.32$$

Elemen-elemen off-diagonal dari J_2 adalah

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_n|} = |V_k Y_{kn}| \cos (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad n \neq k \quad 2.33$$

Elemen-elemen diagonal dari J_3 adalah

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.34$$

Elemen-elemen off-diagonal dari J_3 adalah

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -|V_k V_n Y_{kn}| \cos (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad n \neq k \quad 2.35$$

Elemen-elemen diagonal dari J_4 adalah

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|V_k||Y_{kk}| \sin \theta_{kk} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N |V_n Y_{kn}| \sin (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad 2.36$$

Elemen-elemen off-diagonal dari J_4 adalah

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_n|} = -|V_k Y_{kn}| \sin (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad n \neq k \quad 2.37$$

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai $\Delta P_n^{(k)}$ dan $\Delta Q_n^{(k)}$ maka kita selisihkan nilai P dan Q yang telah ditetapkan (*specified*) pada bus tersebut dengan nilai P dan Q yang dihitung (*calculated*) pada bus tersebut menggunakan Persamaan 2.25 dan 2.26, sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$\Delta P_n^{(k)} = P_{n,spec} - P_{n,calc}^{(k)} \quad 2.38$$

dan

$$\Delta Q_n^{(k)} = Q_{n,spec} - Q_{n,calc}^{(k)} \quad 2.39$$

Untuk menghitung besar tegangan dan sudut tegangan yang baru pada bus dengan menyelesaikan proses perhitungan pada Persamaan 2.29, sehingga didapatkan nilai $\Delta \delta^{(k)}$ dan $\Delta |V^{(k)}|$.

$$\delta_n^{(k+1)} = \delta_n^{(k)} + \Delta \delta_n^{(k)} \quad 2.40$$

dan

$$|V_n^{(k+1)}| = |V_n^{(k)}| + \Delta |V_n^{(k)}| \quad 2.41$$

2.7 DigSILENT

Program Power Factory atau biasa disebut DIGSILENT merupakan *software engineering tool* untuk analisis jaringan ketenagaan listrik, transmisi dan distribusi. DIGSILENT merupakan kepanjangan dari “*Digital SimuLation Electrical NeTwork calculation program*”. Inti dari *software* ini adalah rekayasa

yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi (Zenny Jaelani, 2013).

DIgSILENT adalah perangkat lunak analisis sistem tenaga yang pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antar muka satu baris, diagram satu baris interaktif, juga termasuk fungsi menggambar, kemampuan mengedit dan semua relevan statis dan dinamis fitur perhitungan. DIgSILENT PowerFactory dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas dan programmer dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah besar dan diimplementasi oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga.

Dalam rangka memenuhi kebutuhan analisis sistem kekuasaan saat ini, kekuatan sistem paket perhitungan DIgSILENT dirancang sebagai alat rekayasa terpadu yang menyediakan teknik lengkap “*walk-around*” melalui semua fungsi yang tersedia, bukannya sekumpulan modul perangkat lunak yang berbeda. Fitur kunci berikut ini diberikan dalam satu program executabel tunggal DIgSILENT PowerFactory:

1. Fungsi inti PowerFactory: Definisi, modifikasi dan organisasi kasus, rutinitas numerik inti, dan fungsi dokumentasi output.
2. Garis grafis dan data penanganan kasus tunggal interaktif terpadu.
3. Elemen daya sistem dan database pada studi kasus-kasus dasar.
4. Fungsi perhitungan terintegrasi (misalnya garis dan perhitungan parameter mesin berdasarkan informasi geometris atau papan nama/nameplate).
5. Sistem tenaga konfigurasi jaringan dengan akses interaktif atau online ke sistem SCADA.
6. Interface yang generik untuk sistem pemetaan berbasis komputer (Zenny Jaelani, 2013).