

**ANALISIS JATUH TEGANGAN DAN RUGI DAYA SISTEM
TRANSMISI 70kV PADA PLTA SENGGURUH-GI KEBONAGUNG
SERTA UPAYA-UPAYA PERBAIKANNYA**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

GAGAH PRATAMA PUTRA
NIM. 115060300111059

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS JATUH TEGANGAN DAN RUGI DAYA SISTEM TRANSMISI 70kV
PADA PLTA SENGGURUH-GI KEBONAGUNG SERTA UPAYA-UPAYA
PERBAIKANNYA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



GAGAH PRATAMA PUTRA
NIM. 115060300111059

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Teguh Utomo, M.T.
NIP. 19650913 199103 1 003

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIK. 19580609 198703 1 003

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS JATUH TEGANGAN DAN RUGI DAYA SISTEM TRANSMISI 70kV
PADA PLTA SENGGURUH-GI KEBONAGUNG SERTA UPAYA-UPAYA
PERBAIKANNYA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

GAGAH PRATAMA PUTRA

NIM. 115060300111059

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi
pada tanggal 29 Oktober 2015

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Wijono, M.T., Ph.D.
NIP. 19621111 19890 3 1003

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc
NIP. 19630106 198802 1 001

Dosen Penguji III

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya-Nya. Atas izin-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak penyelesaian skripsi ini tidak mungkin terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Aziz Muslim selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Teguh Utomo dan Bapak Mahfudz Shidiq selaku dosen pembimbing yang telah sabar membimbing dan memberikan masukan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Ali Mustofa dan Bapak Moch. Rif'an, selaku Kaprodi dan dosen Penasihat Akademik, serta seluruh dosen Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Terima kasih atas masukan dan nasihat yang telah diberikan selama menjalani perkuliahan.
4. Keluarga tercinta, Ibu, Bapak dan Marcel. Terima kasih atas doa, dukungan, semangat, kesabaran, pelajaran hidup yang tak ternilai dan segalanya yang telah diberikan.
5. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran, Inverter 2011 dan Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Elektro atas masukan dan dukungannya selama ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Malang, Oktober 2015

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
RINGKASAN	vi
SUMMARY	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pandangan Umum Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Gardu Induk.....	6
2.2.1 Pengertian Gardu Induk.....	6
2.2.2 Fungsi Gardu Induk.....	6
2.3 Daya Listrik.....	7
2.3.1 Daya Aktif	7
2.3.2 Daya Reaktif.....	7
2.3.3 Daya Semu.....	7
2.4 Faktor Daya	7
2.5 Jatuh Tegangan (<i>Voltage Drop</i>)	8
2.6 Rugi Daya.....	9
2.7 Kapasitor.....	10
2.8 Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik	12
2.8.1 Persamaan Dasar Aliran Daya.....	13
2.8.2 Klasifikasi Bus.....	15
2.8.3 Metode Newton Raphson	16
2.8.4 Pemakaian Metode Newton-Raphson Pada Analisis Aliran Daya	17

2.8.5	Perhitungan pada PV Bus	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		22
3.1	Studi Literatur	22
3.2	Studi Lapangan	23
3.3	Perhitungan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya Listrik	23
3.5	Kesimpulan dan Saran	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		24
4.1	Pendahuluan	24
4.2	Gambaran Umum Sistem Tenaga Listrik 70kV GI Kebonagung-PLTA Sengguruh	24
4.3	Keadaan Sistem Pada Keadaan Sekarang	26
4.3.1	<i>Single Line Diagram</i>	26
4.3.2	Analisis Aliran Daya	27
4.3.3	Kondisi Tegangan dan Rugi Daya	27
4.4	Upaya Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung	41
4.4.1	Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Sengguruh	41
4.4.2	Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Turen	46
4.4.3	Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Gampingan	49
4.4.4	Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Karangates	53
4.4.5	Penempatan Kapasitor yang Optimal	56
BAB V PENUTUP		58
5.1	Kesimpulan	58
5.2	Saran	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Satu Garis (GI Kebonagung, GI Turen, GI Sengguruh, GI Gampingan, dan GI Karangates)	2
Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik.....	5
Gambar 2.2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik.....	6
Gambar 2.3 Segitiga Daya.....	7
Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Saluran Pendek	8
Gambar 2.5 Diagram Fasor Saluran Pendek.....	9
Gambar 2.6 Pemasangan Kapasitor Secara Paralel	11
Gambar 2.7 Diagram fasor arus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor.....	12
Gambar 2.8 Diagram fasor tegangan	12
Gambar 2.9 Gambar Komponen Bus i-k.	15
Gambar 2.10 Diagram Alir Langkah- Langkah Pengerjaan Metode Newton-Raphson. 20	
Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian.....	22
Gambar 4.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung	25
Gambar 4.2 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung dengan Beban Terpasang.....	27
Gambar 4.3 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung dalam besaran per unit.....	28
Gambar 4.4 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung dengan saluran transmisi dalam bentuk admitansi	29

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Level Tegangan di PLN.....	6
Tabel 2.2 Pemasangan Kapasitor secara Seri dan Paralel	11
Tabel 2.3 Tabel Variabel Bus	16
Tabel 2.4 Elemen- elemen matriks Jacobian	18
Tabel 4.1 Data Impedansi Saluran.....	25
Tabel 4.2 Data Beban Tiap Gardu Induk.....	26
Tabel 4.3 Hasil perhitungan pada kondisi sekarang	40
Tabel 4.4 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Sengguruh.....	46
Tabel 4.5 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Turen	49
Tabel 4.6 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Gampingan	52
Tabel 4.7 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Karangates	55
Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Tegangan dan Penurunan Rugi Daya.....	56



RINGKASAN

Gagah Pratama Putra, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Oktober 2015, *Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi Daya pada Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung Serta Upaya-upaya Perbaikannya*, Dosen Pembimbing: Teguh Utomo dan Mahfudz Shidiq.

Kondisi penyediaan dan keandalan listrik telah menjadi indikator pertumbuhan ekonomi nasional. Sistem tenaga listrik yang andal dan berkualitas baik serta memenuhi standar mempunyai kontribusi yang sangat penting bagi masyarakat. Meningkatnya usaha di bidang industri yang umumnya bersifat induktif menyebabkan terjadinya rugi tegangan. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kondisi tegangan dan rugi daya pada sistem transmisi 70kV pada PLTA Sengguruh-GI Kebonagung agar sesuai dengan standar toleransi sebesar +5% s/d -10%. Perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya ini bisa dilakukan dengan injeksi daya reaktif melalui kapasitor.

Kondisi tegangan pada saat ini belum memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%. Tegangan di GI Kebonagung sebesar 67,4 kV, GI Sengguruh sebesar 61,97 kV, GI Turen sebesar 62,62 kV, GI Gampingan sebesar 61,91 kV, GI Karangates sebesar 60,28 kV, dan rugi daya total sebesar 3,60 MW dan 6,66 MVAR.

Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Sengguruh sebesar 51,11 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 67,4 kV (naik 5,43 kV), GI Turen sebesar 65,04 kV (naik 2,42 kV), GI Gampingan sebesar 67,21 kV (naik 5,30 kV), GI Karangates sebesar 65,86 kV (naik 5,58 kV), dan rugi daya total sebesar 3,25 MW dan 6,05 MVAR (turun 0,35 MW dan 0,61 MVAR). Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Turen sebesar 50,46 MVA belum berhasil memenuhi toleransi tegangan, dikarenakan tegangan di GI Karangates masih melebihi toleransi tegangan. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 64,36 kV (naik 3,04 kV), GI Turen sebesar 67,4 kV (naik 4,78 kV), GI Gampingan sebesar 64,42 kV (naik 2,51 kV), GI Karangates sebesar 62,75 kV (naik 2,47 kV), dan rugi daya total sebesar 3,46 MW dan 6,42 MVAR (turun 0,14 MW dan 0,24 MVAR). Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Gampingan sebesar 50,52 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 67,19 kV (naik 5,22 kV), GI Turen sebesar 65,13 kV (naik 2,51 kV), GI Gampingan sebesar 67,4 kV (naik 5,49 kV), GI Karangates sebesar 65,65 kV (naik 5,37 kV), dan rugi daya total sebesar 3,25 MW dan 6,06 MVAR (turun 0,35 MW dan 0,60 MVAR). Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Karangates sebesar 38,34 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 65,99 kV (naik 4,02 kV), GI Turen sebesar 64,42 kV (naik 1,80 kV), GI Gampingan sebesar 65,84 kV (naik 3,93 kV), GI Karangates sebesar 67,4 kV (naik 7,12 kV), dan rugi daya total sebesar 3,73 MW dan 6,42 MVAR (naik 0,13 MW dan turun 0,24 MVAR).

Dari data dan uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa pemasangan kapasitor yang paling optimal adalah di GI Sengguruh karena dapat menaikkan tegangan terbesar dan memiliki total rugi daya sistem terkecil.

Kata kunci – Jatuh Tegangan, Rugi Daya, Kapasitor

SUMMARY

Gagah Pratama Putra, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, October 2015, Voltage Drop and Power Losses Analysis on 70kV Transmission System at PLTA Sengguruh-GI Kebonagung and Its Improvement, Academic Supervisor: Teguh Utomo and Mahfudz Shidiq.

The condition and reliability of electricity supply has become an indicator of national economic growth. Electric power systems are reliable, good quality and meet the standards provide a very important contribution to society. Increased efforts in the field of industry, generally inductive-load, causing voltage drop. This study aims to improve the conditions of voltage and power losses at 70kV transmission system in PLTA Sengguruh-GI Kebonagung to meet the standard tolerance of + 5% to -10%. Improvement of voltage drop and power losses can be done with the injection of reactive power through a capacitor.

Voltage conditions do not currently meet the predetermined voltage tolerance of PT. PLN (Persero) by + 5% until -10%. Voltage in GI Kebonagung amounted to 67.4 kV, GI Sengguruh amounted to 61.97 kV, GI Turen amounted to 62.62 kV, GI Gampingan amounted to 61.91 kV, GI Karangates amounted to 60.28 kV, and the total power loss of 3.60 MW and MVAR.

Efforts to improve with the installation of capacitors in GI Sengguruh of 51.11 MVA has successfully met the voltage tolerance. Voltage in GI Sengguruh amounted to 67.4 kV (increase 5.43 kV), GI Turen amounted to 65.04 kV (increase 2.42 kV), GI Gampingan amounted to 67.21 kV (increase 5.30 kV), GI Karangates amounted to 65.86 kV (increase 5.58 kV), and the total power loss of 3.25 MW and 6.05 MVAR (decrease 0.35 MW and 0.61 MVAR). Efforts to improve with the installation of capacitors in Turen GI of 50.46 MVA has not managed to meet the tolerance voltage, because the voltage at the GI Karangates still exceeds the voltage tolerance. Voltage in GI Sengguruh amounted to 64.36 kV (increase 3.04 kV), GI Turen amounted to 67.4 kV (increase 4.78 kV), GI Gampingan amounted to 64.42 kV (increase 2.51 kV), GI Karangates amounted to 62.75 kV (increase 2.47 kV), and the total power loss of 3.46 MW and 6.42 MVAR (decrease 0.14 MW and 0.24 MVAR). Efforts to improve with the installation of capacitors in GI Gampingan of 50.52 MVA has successfully met the voltage tolerance. Voltage in GI Sengguruh amounted to 67.19 kV (increase 5.22 kV), GI Turen amounted to 65.13 kV (increase 2.51 kV), GI Gampingan amounted to 67.4 kV (increase 5.49 kV), GI Karangates amounted to 65.65 kV (increase 5.37 kV), and the total power loss of 3.25 MW and 6.06 MVAR (decrease 0.35 MW and 0.60 MVAR). Efforts to improve with the installation of capacitors in GI Karangates of 38.34 MVA has successfully met the voltage tolerance. Voltage in GI Sengguruh amounted to 65.99 kV (increase 4.02 kV), GI Turen amounted to 64.42 kV (increase 1.80 kV), GI Gampingan amounted to 65.84 kV (increase 3.93 kV), GI Karangates amounted to 67.4 kV (increase 7.12 kV), and the total power loss of 3.73 MW and 6.42 MVAR (increase 0.13 MW and decrease 0.24 MVAR).

From data and explanation above, installation of the optimal capacitor is in the GI Sengguruh because it can increase the greatest voltage and have the smallest total system power loss.

Keywords – Voltage Drop, Power Losses, Capacitors

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kondisi penyediaan dan keandalan listrik saat ini telah menjadi indikator pertumbuhan ekonomi nasional. PT. PLN (PERSERO) sebagai perusahaan yang mengelola penyediaan tenaga listrik selalu berusaha untuk meningkatkan penyediaan dan keandalan listrik bagi konsumen. Sistem tenaga listrik yang andal dan energi listrik dengan kualitas yang baik dan memenuhi standar, mempunyai kontribusi yang sangat penting bagi kehidupan masyarakat.

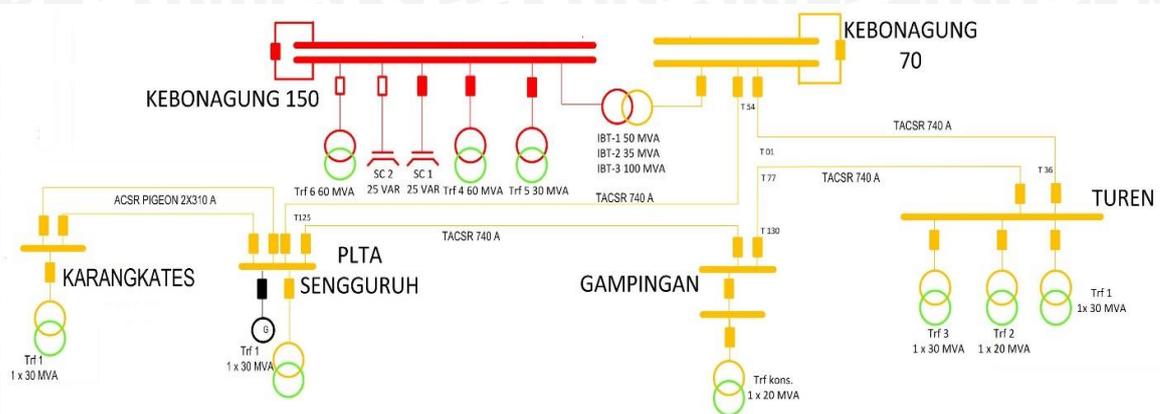
Ditinjau dari aspek kebutuhan energi listrik, konsumsi energi listrik di Malang Raya masih cukup besar di wilayah Jawa Timur. Pertumbuhan permintaan energi listrik hingga saat ini dinilai masih tinggi karena wilayah ini masih akan terus berkembang sehingga energi listrik dan sarana kelistrikannya seperti pembangkitan, transmisi dan distribusi energi listrik masih perlu ditingkatkan, sehingga PT. PLN (Persero) dituntut untuk terus meningkatkan kinerja pelayanannya dalam melayani ketersediaan energi listrik di Malang Raya.

Kondisi wilayah Jawa bagian selatan, merupakan wilayah yang jarang terdapat pembangkit listrik, sehingga sistem kelistrikannya bergantung pada wilayah Jawa bagian utara yang notabene terdapat banyak pembangkit- pembangkit listrik. Hal ini tentunya sangat berpengaruh terhadap kualitas tegangan di wilayah ini karena adanya rugi tegangan dalam sistem penyalurannya.

Pada sisi lain, meningkatnya usaha dibidang industri yang umumnya bersifat beban induktif, menyebabkan kebutuhan daya reaktif induktif meningkat. Meningkatnya daya reaktif induktif pada suatu sistem mengakibatkan terjadinya rugi tegangan. Terjadinya rugi tegangan pada penyaluran daya listrik akan berpengaruh terhadap besarnya susut energi (*losses*). Susut energi dalam sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari. Salah satu yang bisa dilakukan untuk mengurangi susut energi (*losses*) adalah melakukan perbaikan profil tegangan. Oleh karena itu tegangan pada sistem perlu dijaga sehingga tetap pada batas-batas yang diizinkan.

Pada sistem di transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung, terdapat 5 gardu induk, yaitu GI Kebonagung, GI Sengguruh, GI Turen, GI Gampingan dan GI Karangates. Sistem ini mendapat pasokan daya dari 2 sumber, yaitu GI Kebonagung

sabagai GI sumber dan PLTA Sengguruh yang berkapasitas 30 MVA yang terhubung ke GI Sengguruh. Sedangkan ketiga gardu induk lain termasuk gardu beban, yaitu GI Turen, GI Gampingan, dan GI Karangates. Jika disederhanakan, maka sistem ini dapat digambarkan seperti gambar 1.1 dibawah ini.



Gambar 1.1 Diagram Satu Garis (GI Kebonagung, GI Turen, GI Sengguruh, GI Gampingan, dan GI Karangates)

Sumber : PT.PLN (PERSERO), 2012

Gardu Induk Kebonagung merupakan Gardu Induk yang menurunkan tegangan dari 150kV menjadi 20kV untuk distribusi, dan menjadi 70kV, salah satunya ke Gardu Induk Tuen dan Gardu Induk Sengguruh. Berdasarkan data PT PLN (PERSERO), GI Kebonagung telah mengalami jatuh tegangan, terutama pada beban puncak, yang pada awalnya bertegangan nominal 150kV kadang hanya mendapat pasokan kurang dari 140kV, sehingga pada salah satu gardu induk, yaitu Gardu Induk Gampingan hanya mendapat tegangan kurang dari 70kV, yaitu sebesar 61 kV. Hal ini melebihi standar jatuh tegangan yang telah ditetapkan, yaitu sebesar +5% hingga -10%. Jika jatuh tegangan ini tidak segera diperbaiki tentu akan mengganggu sistem di Gardu Induk Gampingan dan sistem transmisi 70kV pada umumnya.

PT. PLN (PERSERO) telah mengupayakan berbagai cara untuk memperbaiki jatuh tegangan, yaitu dengan cara mengubah tap transformator hingga pemasangan 2 buah kapasitor berkapasitas masing-masing 25 MVAR di Gardu Induk Kebonagung. Namun upaya ini dinilai masih belum bisa memperbaiki jatuh tegangan di sisi transmisi 70kV.

Dengan latar belakang di atas maka permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah melakukan analisis jatuh tegangan pada sistem transmisi 70kV, kemudian melakukan perbaikan/peningkatan tegangan di subsistem tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang dibahas dalam skripsi ini disusun dalam rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana keadaan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung sebelum upaya perbaikan.
2. Bagaimana keadaan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung setelah upaya perbaikan.
3. Dimanakah penempatan kapasitor yang paling optimal dalam upaya perbaikan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan dalam skripsi ini dibatasi dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Tempat penelitian di Gardu Induk Kebonagung, Gardu Induk Turen, Gardu Induk Sengguruh, Gardu Induk Gampangan, dan Gardu Induk Karangates.
2. Metode analisis aliran daya yang digunakan adalah metode Newton Raphson.
3. Upaya perbaikan dilakukan di 4 lokasi, yaitu GI Sengguruh, GI Turen, GI Gampangan, dan GI Karangates.
4. Dalam perhitungan dengan PV Bus, diasumsikan kapasitas daya reaktif yang diinjeksikan tidak dibatasi.

1.4 Tujuan

Tujuan dibuatnya skripsi ini adalah:

1. Mengetahui keadaan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung.
2. Mengetahui keadaan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung setelah upaya perbaikan.
3. Mengetahui penempatan kapasitor yang paling optimal dalam upaya perbaikan tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari skripsi ini adalah mengetahui seberapa besar jatuh tegangan di GI Gampingan dan alternatif perbaikan jatuh tegangan, sehingga dengan adanya penelitian ini, diharapkan bisa dijadikan acuan oleh APP PLN bila ingin memperbaiki jatuh tegangan yang terjadi di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung untuk benar-benar memenuhi batas toleransi jatuh tegangan yang telah ditetapkan yaitu sebesar + 5% hingga -10% dari tegangan nominal sistem.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika pembahasan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar analisa dan untuk mendukung permasalahan yang diungkap

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini yang terdiri dari metode studi literatur, pengambilan data, perhitungan data dan analisa data serta pengambilan kesimpulan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pembahasan, perhitungan, dan analisis data yang diajukan dalam penelitian.

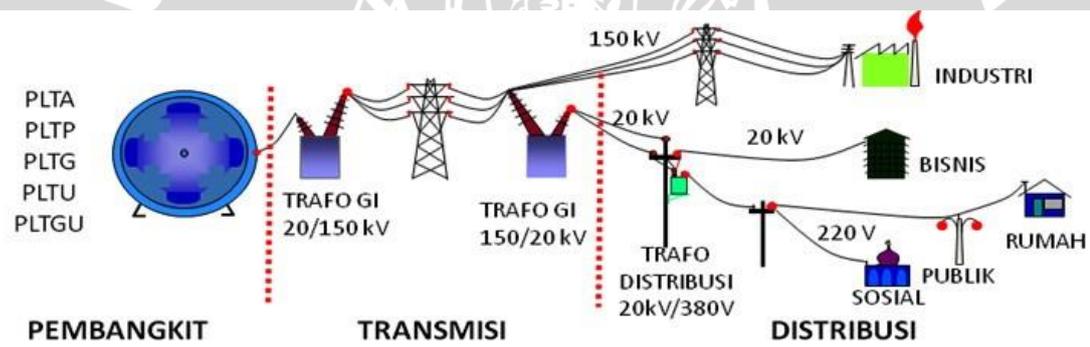
BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan hasil dan pembahasan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pandangan Umum Sistem Tenaga Listrik

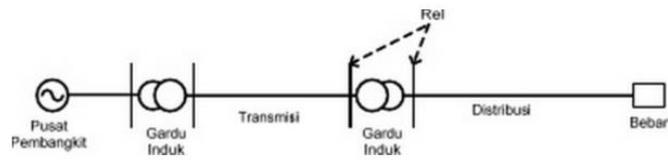
Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban) melalui beberapa tahapan proses. Seperti yang terlihat pada gambar 2.1, berawal dari pembangkit tenaga listrik yang menghasilkan energi listrik lalu disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pemakai melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar (melalui jaringan distribusi).



Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Sumber : Ehendra (2014)

Sistem pembangkit (*generation plant*) terdiri dari satu atau lebih unit pembangkit yang akan mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dan harus mampu menghasilkan daya listrik yang cukup sesuai kebutuhan konsumen. Sistem transmisi berfungsi mentransfer energi listrik dari unit-unit pembangkitan di berbagai lokasi dengan jarak yang jauh ke sistem distribusi, sedangkan sistem distribusi berfungsi untuk menghantarkan energi listrik ke konsumen, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

Sumber : Reinaldo (2009:3)

Terdapat beberapa tegangan yang biasa dipakai oleh PLN. PLN sendiri membagi tegangan tersebut dalam beberapa level seperti yang terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Level Tegangan di PLN

No.	Tegangan (kV)	Kelompok Tegangan
1.	500	Tegangan Ekstra Tinggi
2.	150	Tegangan Tinggi
3.	70	Tegangan Tinggi
4.	20	Tegangan Menengah
5.	12	Tegangan Menengah
6.	0,22/0.38	Tegangan Rendah

Sumber : PT PLN(Persero) (2011)

2.2 Gardu Induk

2.2.1 Pengertian Gardu Induk

Gardu induk ialah bagian dari suatu sistem tenaga yang dipusatkan pada suatu tempat tertentu, berisikan sebagian besar ujung-ujung saluran transmisi atau distribusi (the ends of transmission or distribution lines), perlengkapan hubung-bagi beserta bangunannya (switchgear and housing) dan dapat juga berisi transformator-transformator. Suatu gardu induk umumnya berisikan peralatan keamanan atau kontrol.

2.2.2 Fungsi Gardu Induk

Gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi untuk:

1. Menaikkan dan menurunkan tegangan sistem
2. Pengukuran, pengawasan operasi serta pengaturan, pengamanan dari sistem tenaga listrik
3. Mengatur penyaluran daya ke gardu induk lain melalui jaringan transmisi

2.3 Daya Listrik

2.3.1 Daya Aktif

Daya Aktif (*Active Power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan usaha atau energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah watt.

$$P = V I \cos \varphi \quad (2.1)$$

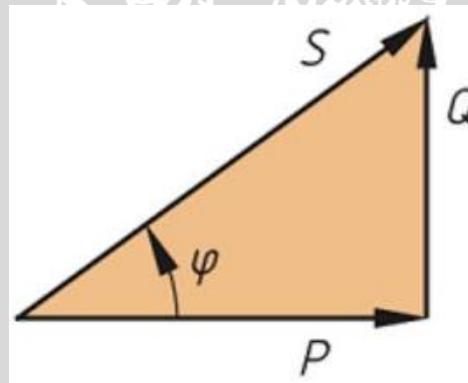
2.3.2 Daya Reaktif

Daya Reaktif (*reactive power*) adalah daya yang di suplai oleh komponen reaktif. Satuan daya reaktif adalah VAR.

$$Q = V I \sin \varphi \quad (2.2)$$

2.3.3 Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms (V_{rms}) dan arus rms (I_{rms}) dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri antara daya aktif dan daya reaktif. Satuan daya nyata adalah VA. Hubungan daya nyata, daya semu, dan daya reaktif dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Segitiga Daya

Sumber : Reinaldo (2009:5)

2.4 Faktor Daya

Faktor daya dapat didefinisikan sebagai rasio antara daya nyata (watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam rangkaian listrik bolak-balik. Faktor daya dapat dirumuskan :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

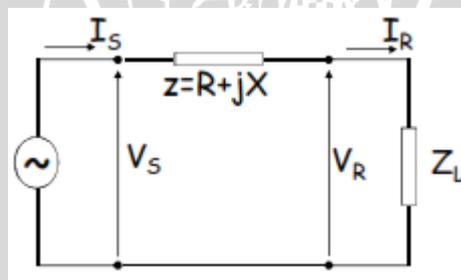
Dari rumus diatas didapatkan bahwa makin besar daya reaktif suatu beban, maka semakin kecil faktor dayanya. Begitu sebaliknya, semakin kecil daya reaktif suatu Beban, maka semakin besar faktor dayanya.

Faktor daya terbelakang (*lagging*) terjadi pada kondisi dimana arus terbelakang terhadap tegangan dan keadaan ini dijumpai pada jaringan yang banyak terdapat beban induktif. Sebaliknya, faktor daya mendahului (*leading*) terjadi pada kondisi dimana arus mendahului tegangan dan keadaan ini dijumpai pada jaringan yang terdapat beban kapasitif.

2.5 Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*)

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi jatuh tegangan pada suatu sistem distribusi, antara lain tahanan (R), panjang jaringan, dan ukuran penghantar. Tahanan pada penghantar mengalami rugi-rugi dan rugi-rugi tersebut terdisipasi menjadi panas. Panjang jaringan dapat mengakibatkan perbedaan tegangan antara sisi kirim dan sisi terima. Semakin panjang jaringan, perbedaan tegangan dan rugi daya listriknya juga akan semakin besar.

Untuk saluran udara yang disebut saluran pendek, kapasitansi dapat diabaikan. Secara umum rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada gambar 2.4 terdiri dari tahanan dan reaktansi yang terhubung seri.



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Saluran Pendek
Sumber : Shidiq (2015:4)

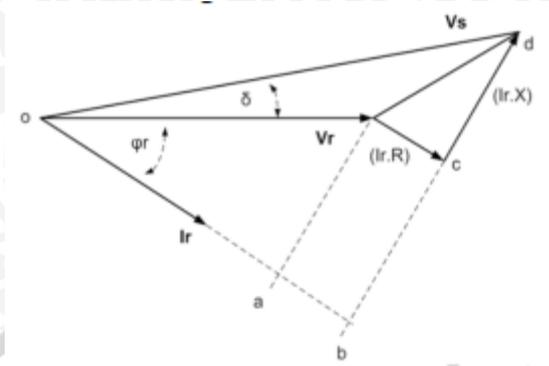
Dengan:

- V_s : tegangan sisi kirim
- V_R : tegangan sisi terima
- I_s : arus sisi kirim
- I_R : arus sisi terima
- $Z = R + jX$: impedansi saluran
- Z_L : impedansi beban

Berdasarkan rangkaian ekuivalen diatas, maka persamaannya adalah

$$V_s = V_R + (R + jX).I = V_R + R.I + jX.I \quad (2.4)$$

Sedangkan diagram fasor untuk saluran pendek dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Fasor Saluran Pendek
Sumber : Shidiq (2015:6)

Garis putus-putus pada diagram fasor merupakan bagian *real* dan *imajiner* dari impedansi *drop* ZI. Jatuh tegangan selanjutnya diartikan sebagai selisih antara besaran sumber dan tegangan beban sebagai berikut:

$$V_{drop} = V_S - V_R \quad (2.5)$$

Dengan: V_{drop} : jatuh tegangan (V)

Jatuh tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan V_r (*Voltage Regulation*) yang dinyatakan dengan persamaan

$$V_r = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100\% \quad (2.6)$$

2.6 Rugi Daya

Dalam proses transmisi dan distribusi tenaga listrik, seringkali mengalami rugi-rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo yang digunakan. Kedua jenis rugi-rugi daya tersebut memberikan pengaruh yang besar terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirim ke pelanggan. Nilai tegangan yang turun melebihi toleransi yang telah ditetapkan dapat menyebabkan tidak optimalnya kerja dari peralatan listrik di sisi konsumen.

Pemilihan jenis kabel yang digunakan pada jaringan transmisi akan mempengaruhi besar rugi daya. Jenis kabel dengan resistansi yang kecil akan dapat memperkecil rugi-rugi daya. Besar rugi-rugi daya dapat ditulis dalam rumus berikut :

$$Loss = 3I^2R \quad (2.7)$$

Dimana, Loss = rugi daya pada saluran (Watt)
 R = Resistansi saluran per fasa (Ohm)
 I = Arus yang mengalir per fasa (Ampere)

Nilai resistansi dari suatu penghantar dipengaruhi oleh beberapa parameter. Berikut ini adalah persamaan resistansi penghantar :

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.8)$$

Dimana, R = resistansi saluran (ohm)
 ρ = resistivitas bahan penghantar (ohm-meter)
 l = panjang penghantar (meter)
 A = luas penampang (m²)

2.7 Kapasitor

Kapasitor digunakan secara luas pada sistem transmisi maupun distribusi untuk perbaikan faktor daya dan pengaturan tegangan. Pada saluran transmisi, kapasitor berguna untuk mengkompensasi rugi-rugi X^2 dan memastikan tegangan terjaga pada saat beban penuh.

Beban yang bersifat induktif akan menimbulkan jatuh tegangan di sisi penerima, dengan melakukan pemasangan kapasitor, beban akan mendapat daya reaktif. Kompensasi yang dilakukan oleh kapasitor akan mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban. Dengan demikian jatuh tegangan dapat dikurangi.

Selain dapat memperbaiki jatuh tegangan, pemasangan kapasitor juga dapat meningkatkan faktor daya. Berkurangnya nilai daya reaktif yang diserap beban dapat meningkatkan faktor daya.

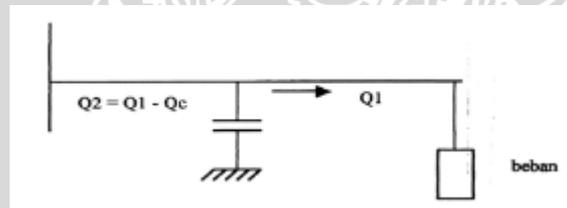
Pemasangan kapasitor bisa dilakukan dengan 2 cara, yaitu secara seri dan paralel. Kapasitor yang dipasang secara seri maupun paralel mempunyai kelebihan dan kekurangan seperti ditunjukkan dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pemasangan Kapasitor secara Seri dan Paralel

No	Tujuan	Pilihan	
		Kapasitor Seri	Kapasitor Paralel
1	Memperbaiki faktor daya	Kedua	Pertama
2	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya normal dan rendah	Pertama	Kedua
3	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya tinggi	Tidak dipakai	Pertama
4	Memperbaiki tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan faktor daya normal dan rendah	Pertama	Tidak dipakai
5	Memperbaiki tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan faktor daya tinggi	Tidak dipakai	Tidak dipakai
6	Mengurangi kerugian saluran	Kedua	Pertama
7	Mengurangi fluktuasi tegangan	Pertama	Tidak dipakai

Sumber : Pabla (1991:281)

Berdasarkan dari tabel diatas, maka pada penelitian ini akan menggunakan kapasitor secara paralel. Pemasangan kapasitor secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pemasangan Kapasitor Secara Paralel

Sumber : Tanjung (2010:4)

Dengan pemasangan kapasitor, nilai arus yang mengalir ke beban akan berkurang sebab beban mendapat suplai daya reaktif dari beban . berikut adalah persamaan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor :

$$S = V_S \cdot I^* \quad (2.9)$$

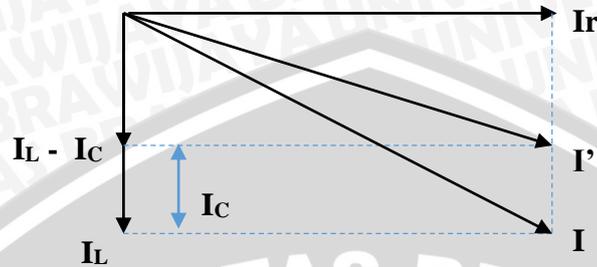
$$I^* = \frac{P+jQ}{V_S} \quad (2.10)$$

$$I = \frac{P-jQ}{V_S^*} \quad (2.11)$$

$$I = \frac{P}{V_S^*} - \frac{jQ}{V_S^*} \quad (2.12)$$

Setelah pemasangan kapasitor, persamaan arusnya dijelaskan pada rumus dibawah serta pada gambar 2.7 :

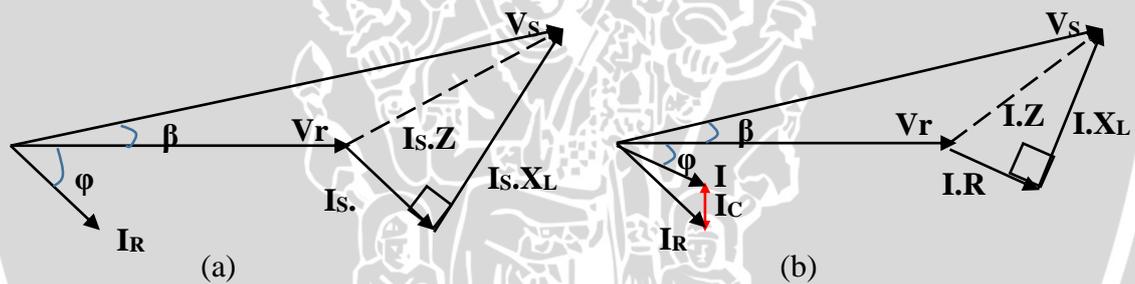
$$I' = \frac{P}{V_s^*} - j \frac{(Q-Q_C)}{V_s^*} \quad (2.13)$$



Gambar 2.7 Diagram fasor arus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor

Sumber : Handajadi (2014:4)

Sedangkan untuk perubahan fasor tegangan akibat pemasangan kapasitor, dapat dijelaskan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram fasor tegangan

(a) Tanpa kapasitor (b) Dengan kapasitor

Sumber : Wijanarko (2009:2)

2.8 Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Analisis aliran daya dibutuhkan untuk menentukan kondisi operasi sistem tenaga dalam keadaan mantap, melalui pemecahan persamaan aliran daya pada jaringan. Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitudo tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran, serta rugi-rugi transmisi yang muncul dalam sistem tenaga. Hasil studi aliran daya dapat dijadikan pedoman dalam perencanaan, pengoperasian sistem, penjadwalan ekonomis sistem pembangkit, dan juga dibutuhkan dalam banyak analisis seperti stabilitas transien dan studi kontingensi.

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang (Stevenson,1996).

Perhitungan analisis aliran beban akan menghasilkan:

1. Vektor tegangan setiap bus dalam kondisi operasi normal dan beban puncak.
2. Aliran daya dan rugi-rugi daya setiap cabang pada yang ditinjau.
3. Daya yang harus dibangkitkan oleh bus berayun.
4. Daya total pembangkitan.
5. Beban total.
6. Rugi-rugi daya total.

Dari hasil perhitungan tersebut dapat digambarkan peta aliran daya, yang digunakan untuk menyempurnakan kondisi-kondisi operasi sistem yang ditinjau dan memberikan alternatif perluasan di masa yang akan datang yang meliputi tegangan sistem, aliran daya, pembangkit dan rugi-rugi sistem. Terdapat empat besaran pada masing-masing bus jaringan yang ditinjau yang memegang peranan, yaitu :

1. Besar tegangan (*magnitude*)
2. Sudut fase tegangan (*angle*)
3. Daya aktif (*active power*)
4. Daya reaktif (*reactive power*)

Dua diantara empat besaran yang terdapat pada tiap bus tersebut telah diketahui atau ditentukan, sedangkan dua besaran lainnya merupakan nilai-nilai yang akan dicari melalui proses iterasi.

2.8.1 Persamaan Dasar Aliran Daya

Persamaan unjuk kerja sistem tenaga listrik dapat dinyatakan dalam bentuk impedansi atau admitansi sebagai berikut:

Dalam bentuk impedansi:

$$E_{bus} = Z_{bus}I_{bus} \quad (2.14)$$

Dalam bentuk admitansi:

$$I_{bus} = Y_{bus}E_{bus} \quad (2.15)$$

Dengan I_{bus} : arus yang mengalir pada suatu bus

E_{bus} : tegangan pada suatu bus

Y_{bus} : admitansi suatu bus

Z_{bus} : impedansi pada suatu bus

Matrik admitansi bus dan matrik impedansi bus dapat disusun dengan atau tanpa melibatkan bus tanah. Jika bus tanah dilibatkan dalam menyusun kedua matrik tersebut, maka elemen-elemen shunt seperti *static* kapasitor, reaktor, *line charging* dan elemen shunt dari rangkaian ekivalen trafo dilibatkan dalam menyusun kedua matrik tersebut dan elemen vektor tegangan E_{bus} dalam persamaan (2.14) dan (2.15) merupakan tegangan antara suatu bus terhadap tanah. Jika bus tanah tidak dilibatkan dalam menyusun matrik Z_{bus} atau Y_{bus} diatas, maka perlu dipilih satu bus sebagai acuan dan elemen vektor tegangan E_{bus} dalam kedua persamaan diatas merupakan beda tegangan antara suatu bus dengan bus acuan.

Pada suatu bus i , daya aktif dan reaktif dinyatakan sebagai:

$$P_i - jQ_i = E_i^* I_i \quad (2.16)$$

Dan arus pada bus i adalah

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} \quad (2.17)$$

I_i akan positif jika arus mengalir masuk kedalam sistem.

Jika elemen-elemen shunt terhadap tanah dilibatkan dalam menyusun matrik Z_{bus} atau Y_{bus} , maka persamaan (2.17) menyatakan arus total yang mengalir dari bus i , sedangkan jika tidak dilibatkan, maka arus total yang mengalir melalui bus i adalah

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} - y_i E_i \quad (2.18)$$

Dimana y_i menyatakan total admitansi shunt bus i terhadap tanah dan $y_i E_i$ menyatakan arus yang mengalir dari bus i ke tanah.

Setelah proses iterasi untuk mengetahui tegangan setiap bus selesai, daya yang mengalir pada setiap saluran dapat dihitung. Arus yang mengalir dari bus i ke bus k adalah

$$i_{ik} = (E_i - E_k)y_{ik} + E_i \frac{y'_{ik}}{2} \quad (2.19)$$

Dengan y_{ik} adalah admitansi cabang yang menghubungkan bus i dan bus k dan y'_{ik} adalah total admitansi shunt saluran ik .

Daya yang mengalir dari bus i ke bus k adalah

$$P_{ik} - jQ_{ik} = E_i^* i_{ik} \quad (2.20)$$

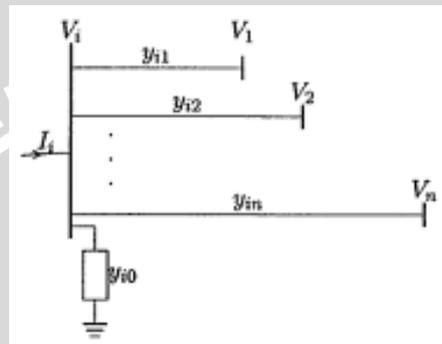
Atau

$$P_{ik} - jQ_{ik} = E_i^*(E_i - E_k)y_{ik} + E_i^*E_i \frac{y'_{ik}}{2} \quad (2.21)$$

Sedangkan daya yang mengalir dari bus k ke bus i adalah

$$P_{ki} - jQ_{ki} = E_k^*(E_k - E_i)y_{ik} + E_k^*E_k \frac{y'_{ik}}{2} \quad (2.22)$$

Rugi-rugi daya cabang i-k merupakan jumlah aljabar dari persamaan (2.21) dan persamaan (2.22). Untuk lebih jelasnya persamaan (2.21) dan (2.22) dapat digambarkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Gambar Komponen Bus i-k.

Sumber: Saadat (1999:209)

2.8.2 Klasifikasi Bus

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, empat besaran yang terdapat pada setiap bus yaitu P_i , Q_i , sudut fasa tegangan θ_i , dan besar tegangan V_i . Pada masing-masing bus dua dari empat besaran tersebut sudah diketahui sedangkan dua yang lain harus dihitung. Dan dari besaran yang harus dihitung tersebut, bus dapat diklasifikasikan menjadi tiga.

1. Bus Beban (*Load Bus*)

Bus beban dikenal dengan PQ bus. Hanya daya nyata yg pada umumnya diketahui sedangkan daya reaktif biasanya diasumsikan dari faktor daya 0,85 atau lebih tinggi. Selisih daya antara daya nyata yang dibangkitkan oleh generator dan daya nyata yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

2. Bus Tegangan (*Voltage-controlled Bus*)

Bus tegangan adalah bus dimana nilai dari *magnitude* tegangan adalah konstan. Bus ini biasanya disebut dengan PV bus. Besar tegangan dan daya aktif diketahui, sedangkan sudut fasa dan daya reaktif tidak diketahui.

3. Slack Bus

Pada *slack* bus variabel yang diketahui adalah tegangan dan sudut fasanya bernilai 0. Biasanya dipilih salah satu bus tegangan sebagai *slack* dan menganggap dayanya tidak diketahui.

Masing-masing bus memiliki variabel yang diketahui dan variabel yang dicari yang berbeda-beda. Seperti yang terdapat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Tabel Variabel Bus

Bus	Variabel Diketahui	Variabel Dicari
PQ	P_i, Q_i	V_i, θ_i
PV	P_i, V_i	Q_i, θ_i
Slack	$\theta_i = 0, V_i$	P_i, Q_i

2.8.3 Metode Newton Raphson

Metode Newton-Raphson adalah metode yang paling dikenal untuk menyelesaikan persamaan polynomial, trigonometri dan persamaan-persamaan lain. Jika nilai x^r dari persamaan non-linear diketahui, maka nilai tersebut didapat dari persamaan berikut. Dengan x^r adalah nilai perkiraan dan Δx^r adalah nilai kesalahan pada iterasi r (Arrillaga, 1994).

$$f(x^{r+1} + \Delta x^r) = f(x^r) + f'(x^r)\Delta x^r + \frac{(\Delta x^r)^2}{2!}f''(x^r) + \dots + \frac{(\Delta x^r)^n}{n!}\frac{d^n x}{dx^n}\Big|_{x^r} \quad (2.23)$$

Jika nilai fungsi turunan kedua dan seterusnya di sisi kanan tidak dipakai maka persamaannya menjadi

$$f(x^{r+1} + \Delta x^r) = f(x^r) + f'(x^r)\Delta x^r \quad (2.24)$$

Atau

$$\Delta y = f'(x^r)\Delta x^r \quad (2.25)$$

Dengan $\Delta y = f(x^{r+1} + \Delta x^r) - f(x^r)$ adalah selisih antara nilai yang benar dengan nilai perkiraan.

Jika nilai x^r dari variabel (x_1, x_2, \dots, x_n) diketahui, maka nilai perkiraan yang mendekati nilai sebenarnya dapat diperoleh dari

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^r \\ \vdots \\ \Delta x_n^r \end{bmatrix}_{x_1^r, \dots, x_n^r} \quad (2.26)$$

Atau

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{bmatrix} = J^{(r)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(r)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(r)} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Dimana

$$\Delta x^r = J^{-1} f(x^r) \quad (2.28)$$

Matriks J adalah matriks Jacobian dari f(x), dimana elemen (i, k) didefinisikan sebagai $\partial f_i / \partial x_k$. Sehingga nilai x^r dapat diperbaiki dengan menggunakan persamaan

$$x_n^{(r)} \text{ baru} = x_n^{(r)} \text{ lama} + \Delta x_n^{(r)} \quad (2.29)$$

Proses ini diulang sampai didapat semua nilai Δy_n memenuhi toleransi yang disyaratkan.

2.8.4 Pemakaian Metode Newton-Raphson Pada Analisis Aliran Daya

Masalah aliran daya dapat diselesaikan dengan metode Newton-Raphson menggunakan sejumlah persamaan nonlinier yang menyatakan daya aktif dan reaktif sebagai fungsi dari besar dan sudut fasa tegangan. Persamaan daya pada suatu bus i dapat ditulis

$$P_i - jQ_i = E_i^* I_i = E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \quad (2.30)$$

Pemisahan bagian riil dan imajiner, maka diperoleh persamaan daya pada bus i adalah

$$P_i = \text{Re} \{ E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \} \quad (2.31)$$

$$Q_i = \text{Re} \{ -E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \} \quad (2.32)$$

Kedua persamaan nonlinier P_i dan Q_i merupakan persamaan-persamaan utama dalam analisis aliran daya dengan menggunakan metode Newton-Raphson. Kedua rumusan ini menghasilkan dua persamaan nonlinier dalam setiap bus. Daya aktif dan daya reaktif adalah diketahui sedangkan besar tegangan dan sudut fasa tegangan tidak diketahui untuk semua bus kecuali pada slack bus dimana besar tegangannya diketahui dan dijaga konstan sehingga terdapat $2(n-1)$ persamaan yang harus diselesaikan untuk penyelesaian aliran daya.

Tegangan dan daya dinyatakan dalam bentuk bilangan kompleks

$$E_i = E_i \angle \delta_i, \quad Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}, \quad \delta_{ik} = \delta_k - \delta_i \quad (2.33)$$

Maka persamaan (2.30) akan menjadi

$$P_i - jQ_i = E_i^* I_i = \sum_{k=1}^n |E_i| |E_k| |Y_{ik}| \angle (\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2.34)$$

Dari pemisahan bagian riil dan imajiner akan didapat persamaan daya aktif

$$P_i = \sum_{k=1}^n |E_i||E_k||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2.35)$$

Dan persamaan daya reaktif

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |E_i||E_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2.36)$$

Jika bus 1 sebagai *swing bus*, maka persamaan linier (2.27) bagi kedua persamaan daya (2.35) dan (2.36) secara singkat dapat ditulis

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta E}{E} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Persamaan-persamaan untuk menentukan elemen-elemen matriks jakobian dapat diturunkan dari persamaan-persamaan daya. Elemen matriks H, J, N, dan L dijelaskan pada tabel 2.4:

Tabel 2.4 Elemen- elemen matriks Jacobian

	Elemen diagonal ($i=k$)	Elemen off-diagonal ($i \neq k$)
H	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{k=1, k \neq i}^n E_i E_k Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = - E_i E_k Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$
N	$E_i \frac{\partial P_i}{\partial E_i} = 2 E_i Y_{ii} \cos \theta_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^n E_k Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$	$E_k \frac{\partial P_i}{\partial E_k} = E_i Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$
J	$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{k=1, k \neq i}^n E_i E_k Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = - E_i E_k Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$
L	$E_i \frac{\partial Q_i}{\partial E_i} = 2 E_i Y_{ii} \sin \theta_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^n E_k Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$	$E_k \frac{\partial P_i}{\partial E_k} = - E_i Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$

Banyaknya iterasi yang diperlukan oleh metode Newton-Raphson yang menggunakan admitansi-admitansi bus tidak tergantung pada banyaknya bus. Sebaliknya, penghitungan unsur-unsur Jakobian memakan waktu yang cukup lama, dan waktu yang diperlukan untuk masing-masing iterasi adalah lebih panjang. Keuntungan dalam waktu penyelesaian menggunakan komputer yang lebih pendek untuk suatu penyelesaian dengan ketelitian yang sama menyebabkan metode Newton-Raphson lebih banyak dipilih untuk semua sistem, kecuali sistem yang sangat kecil.

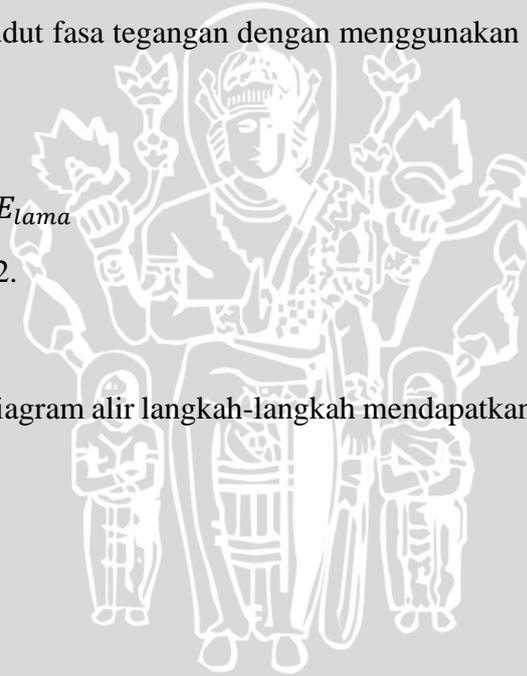
Langkah-langkah yang diperlukan untuk memperoleh tegangan bus dengan menggunakan metode Newton-Raphson adalah sebagai berikut:

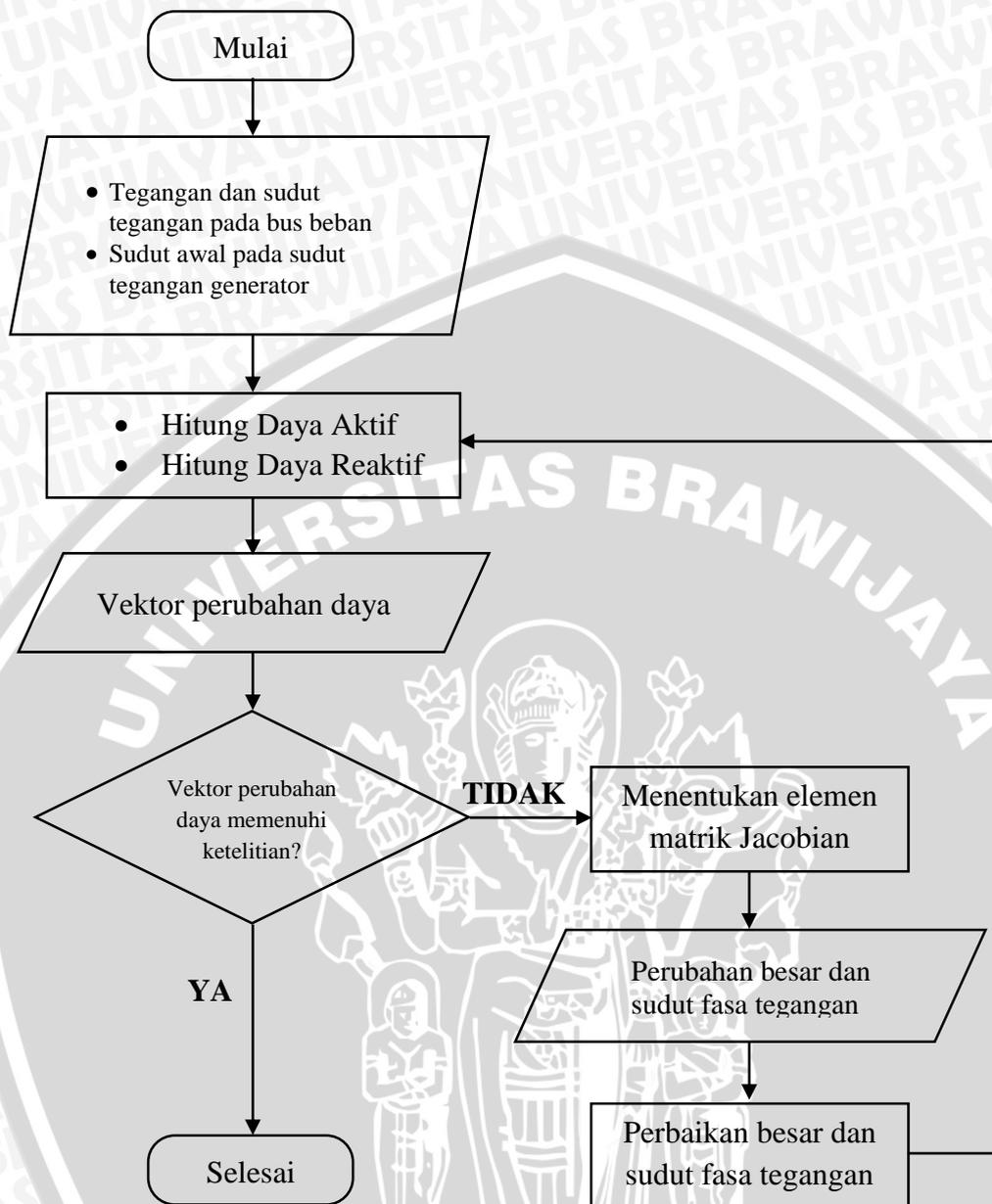
1. Berikan nilai awal besar tegangan dan sudut tegangan untuk semua tegangan bus beban, dan sudut awal bagi semua sudut tegangan bus generator.
2. Hitung daya aktif dan daya reaktif dan kurangkan ke daya aktif dan reaktif yang diketahui sehingga diperoleh vektor perubahan daya. Jika semua elemen vektor ini memenuhi ketelitian yang diberikan maka lanjutkan ke langkah 7, jika tidak lanjutkan ke langkah 3.
3. Tentukan elemen-elemen matrik jakobian dengan menggunakan tabel (2.3)
4. Selesaikan persamaan linier (2.37) untuk memperoleh perubahan besar dan sudut fasa tegangan.
5. Perbaiki besar dan sudut fasa tegangan dengan menggunakan persamaan (2.54) dan (2.55).

$$\delta_{baru} = \delta_{lama} + \Delta\delta \quad (2.54)$$

$$E_{baru} = E_{lama} + \frac{\Delta E}{E} E_{lama} \quad (2.55)$$
6. Kembali ke langkah 2.
7. Selesai.

Berikut merupakan diagram alir langkah-langkah mendapatkan tegangan bus dengan metode Newton-Raphson:





Gambar 2.10 Diagram Alir Langkah- Langkah Pengerjaan Metode Newton-Raphson

Sumber: Shidiq (2009:51)

2.8.5 Perhitungan pada PV Bus

Jika bus i adalah PV Bus, Q_i tidak ditentukan nilainya sehingga tidak diperoleh nilai ΔQ_i , sebaliknya karena besar tegangan dijaga tetap maka $\Delta V_i = 0$. Misalkan bus 2 dalam sistem 4 bus adalah PV bus, maka persamaan linier yang menyatakan hubungan antara perubahan daya dengan perubahan tegangan adalah :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & E_3 \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_2}{\partial E_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & E_3 \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_3}{\partial E_4} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & E_3 \frac{\partial P_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_4}{\partial E_4} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & E_3 \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_3}{\partial E_4} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & E_3 \frac{\partial Q_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_4}{\partial E_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \frac{\Delta E_3}{E_3} \\ \frac{\Delta E_4}{E_4} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Secara umum kajian yang digunakan dalam skripsi ini adalah kajian yang bersifat analisis mengenai tegangan dan rugi-rugi daya listrik di sistem transmisi 70kV PLTA Sengguh-GI Kebonagung. Metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian.

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengkaji berbagai sumber pustaka yang berhubungan dengan judul penelitian. Teori-teori yang berhubungan dengan judul penelitian ini adalah:

1. Mempelajari hal-hal yang berhubungan dengan sistem transmisi, yaitu sistem tenaga listrik, pengertian gardu induk, transformator daya, jatuh tegangan, daya listrik, dan kapasitor.
2. Mempelajari analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan metode Newton Rhapsion.

3.2 Studi Lapangan

Studi lapangan bertujuan untuk mencari data di lapangan yang berkaitan dengan analisis aliran daya di Gardu Induk Kebunagung, Gardu Induk Turen, Gardu Induk Sengguruh, dan Gardu Induk Gampingan. Data-data yang diperoleh selanjutnya akan dijadikan acuan dalam analisa yang akan dilakukan. Studi literatur dan studi lapangan akan menghasilkan data yang akan menjadi acuan dan bahan dalam analisis aliran daya sistem tenaga listrik pada Gardu Induk Kebunagung, Gardu Induk Turen, Gardu Induk Sengguruh, dan Gardu Induk Gampingan. Sumber data pada skripsi ini adalah PT. PLN (Persero) APP Malang. Data-data tersebut meliputi:

1. Diagram satu garis (*single line diagram*) APP Malang
2. Transformator di setiap Gardu Induk.
3. Data daya aktif dan reaktif dari generator yang mengalir ke Gardu Induk.
4. Jenis dan panjang penghantar yang digunakan.
5. Data-data bus meliputi: rating kV, %V, dan sudut.
6. Beban yang dilayani oleh Gardu Induk Kebunagung, Gardu Induk Turen, Gardu Induk Sengguruh, dan Gardu Induk Gampingan.

3.3 Perhitungan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya Listrik

Jatuh tegangan juga termasuk rugi-rugi pada sebuah sistem tenaga listrik yang dihitung dengan persamaan 2.5. Sedangkan rugi-rugi daya listrik pada sistem dihitung dengan persamaan 2.21 dan 2.22.

3.5 Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini akan diambil kesimpulan dan saran. Kesimpulan diambil berdasarkan teori yang dipakai dan hasil perhitungan. Saran dibuat agar bisa menjadi masukan bagi pembaca sebagai bahan untuk melanjutkan penelitian tentang topik ini. Saran dibuat berdasarkan kesulitan yang dialami selama penelitian dan hal-hal lain yang sekiranya perlu untuk dikaji lebih dalam

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

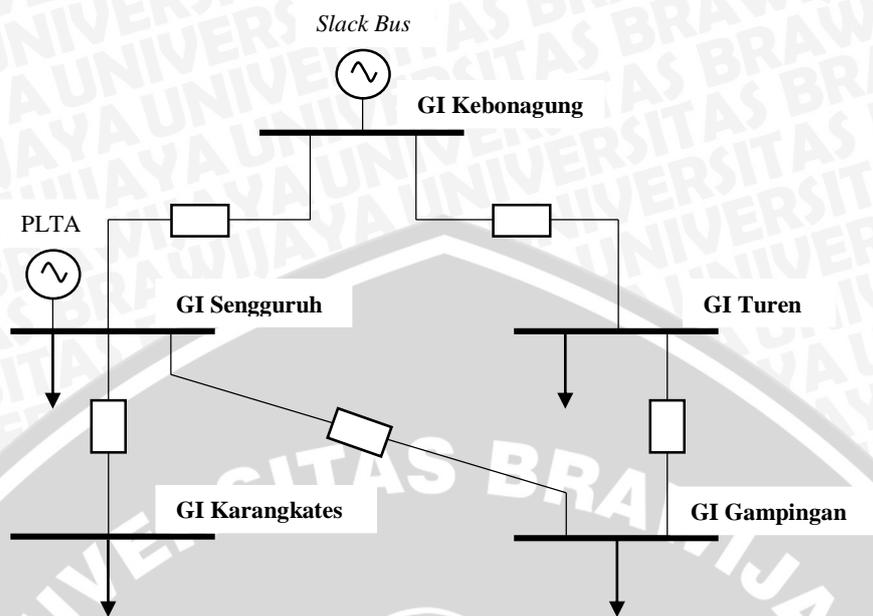
Sistem Tenaga Listrik 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung ini terdapat 5 buah Gardu Induk (GI) 70kV, yaitu GI Kebonagung, GI Turen, GI Sengguruh, GI Gampingan, dan GI Karangates. Area Malang Selatan ini mendapat pasokan dari GI Keboagung 150kV yang kemudian diturunkan menjadi 70kV dan dari PLTA Sengguruh yang berada di area GI Sengguruh. Pada sistem ini terdapat pula konsumen 20kV, yaitu industri kertas yang terdapat di GI Gampingan, dimana GI Gampingan merupakan Gardu Induk yang khusus melayani konsumen tersebut.

Saat ini, keadaan sistem tenaga listrik di area ini terkadang mengalami jatuh tegangan melebihi toleransi yang telah ditetapkan oleh PLN sebesar +5% s/d -10%. Menurut data dari PT PLN (Persero) APP Malang, Gardu Induk Gampingan kadang hanya memperoleh tegangan sebesar 61kV. Salah satu dampak dari jatuh tegangan yang melebihi toleransi ini adalah terhentinya operasi dari industri di kawasan GI Gampingan. Jika hal ini tidak segera ditanggulangi, tentunya ini akan merugikan konsumen tersebut serta konsumen-konsumen besar lainnya pada waktu yang akan datang.

PLN mempunyai rencana baik jangka pendek maupun jangka panjang untuk menyelesaikan ini. Salah satu upayanya yaitu dengan penambahan kapasitor pada salah satu gardu induk. Dengan penambahan kapasitor ini, tentunya akan membuat perubahan dalam aliran daya dan terjadinya kenaikan tegangan. Untuk melihat perubahan-perubahan tersebut, maka analisa akan dilakukan dalam dua keadaan, yaitu kondisi pada saat ini dan kondisi setelah adanya penambahan kapasitor.

4.2 Gambaran Umum Sistem Tenaga Listrik 70kV GI Kebonagung-PLTA Sengguruh

Gambar 4.1 merupakan *Single Line Diagram* sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung yang akan digunakan dalam skripsi ini.



Gambar 4.1 *Single Line Diagram* Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung

Sumber : PT. PLN (Persero) APP Malang

Data yang dipergunakan dalam sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung bersumber dari PT PLN (Persero) Area Pelaksana Pemeliharaan (APP) Malang dan PT Pembangkitan Jawa Bali (PJB) Brantas.

Sedangkan untuk hubungan panjang saluran antar GI dan impedansi saluran dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Impedansi Saluran

NO.	DARI-BUS	KE-BUS	PANJANG SALURAN (KM)	IMPEDANSI SALURAN (Ω /km)	
				R	X
1.	Kebonagung	Turen	21,240	0,2140	0,4080
2.	Kebonagung	Sengguruh	25,775	0,2140	0,4080
3.	Turen	Gampingan	26,100	0,2140	0,4080
4.	Sengguruh	Gampingan	1,345	0,1400	0,4000
5.	Sengguruh	Karangkates 1	12,770	0,3370	0,4094
6.	Sengguruh	Karangkates 2	12,770	0,3370	0,4094

Sedangkan untuk beban rata-rata dari masing- masing gardu induk, dapat dilihat pada tabel dibawah ini

Tabel 4.2 Data Beban Tiap Gardu Induk

No	Gardu Induk	Tegangan (kV)	Pembangkitan		Pembebanan	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	Kebonagung	67,4	-	-	-	-
2	Sengguruh	-	14,53	8,986	21,6030	12,9833
3	Turen	-	0,00	0,000	32,6667	12,4333
4	Gampingan	-	0,00	0,000	10,5000	6,5000
5	Karangkates	-	0,00	0,000	13,3833	8,3500

Ket : GI Kebonagung merupakan *slack bus*

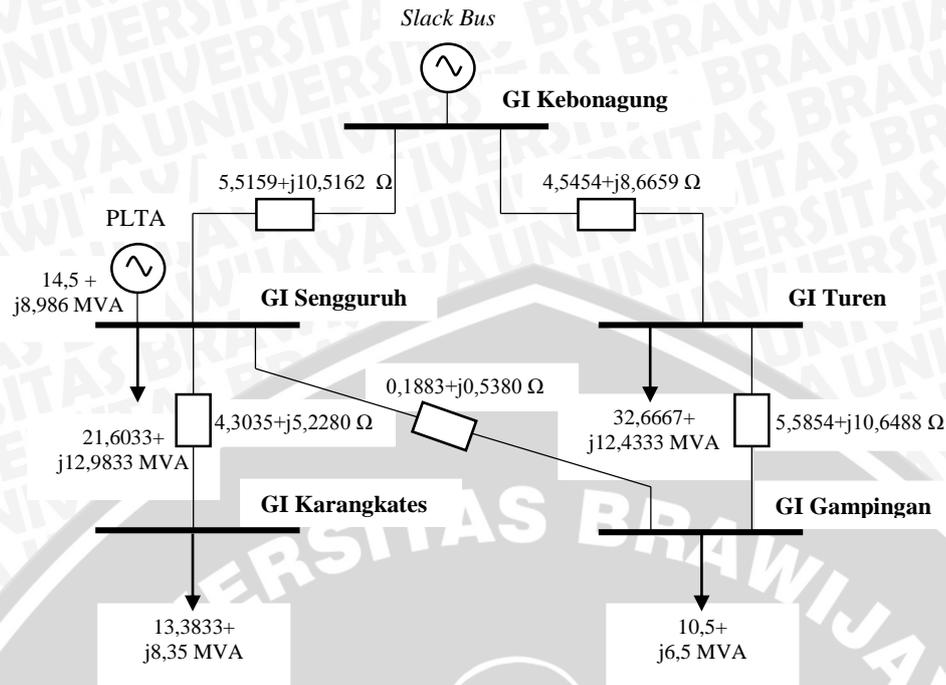
4.3 Keadaan Sistem Pada Keadaan Sekarang

Daya yang digunakan dalam skripsi ini adalah sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung dengan data yang bersumber dari PT. PLN (Persero) APP Malang. Sistem yang akan dianalisa terdiri dari 5 bus,yaitu GI Kebonagung, GI Turen, GI Sengguruh, GI Gampingan, GI Karangkates. Dari kelima bus diatas, dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Slack Bus* : GI Kebonagung
2. *Generator Bus*: GI Sengguruh
3. *Load Bus* : GI Turen, GI Gampingan, GI Karangkates

4.3.1 Single Line Diagram

Gambar 4.2 menunjukkan *single line diagram* sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung dengan berbagai beban terpasang pada masing- masing gardu induk beserta saluran impedansinya.



Gambar 4.2 Single Line Diagram Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung dengan Beban Terpasang

4.3.2 Analisis Aliran Daya

Metode analisis aliran daya yang digunakan pada skripsi ini adalah metode Newton-Raphson. Berdasarkan data pembebanan tiap GI pada sistem tegangan 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung, metode ini digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan pada masing-masing GI yang belum diketahui sebelumnya dan juga menghitung rugi daya pada saluran transmisi.

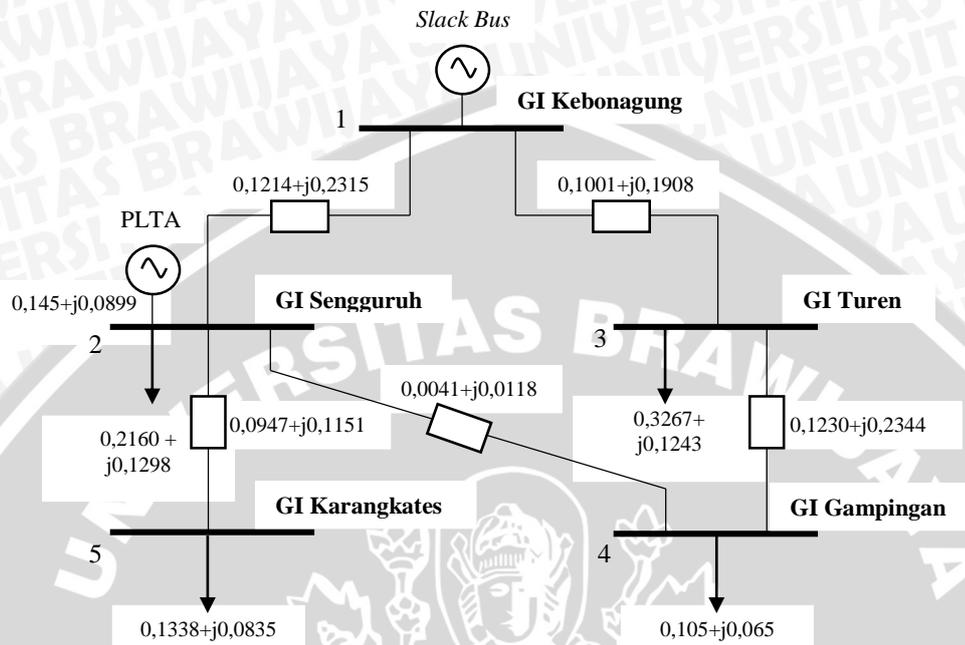
Terdapat beberapa acuan yang digunakan dalam analisa aliran daya ini, yaitu:

1. Tegangan dasar : $kV_{base} = 67,4 \text{ kV}$ (menggunakan acuan di GI Kebonagung)
2. Daya dasar : $MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$
3. Impedansi dasar : $Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{S_{base}} = \frac{67,4^2}{100} = 45,4276$
4. Ketelitian : 0,0001

4.3.3 Kondisi Tegangan dan Rugi Daya

Untuk mendapat informasi tentang besarnya tegangan sudut tegangan, daya nyata dan daya reaktif tiap gardu induk, maupun rugi daya total pada sistem, dapat digunakan metode Newton Raphson. Hal pertama yang dilakukan adalah merubah semua besaran nyata ke besaran per unit sesuai dengan acuan yang telah dijelaskan pada subbab 4.3.2.

Gambar 4.3 menunjukkan *single line diagram* sistem transmisi 70kV GI Kebonagung - PLTA Sengguruh dengan berbagai beban terpasang pada masing- masing gardu induk beserta saluran impedansinya yang telah dirubah dalam besaran per unit.

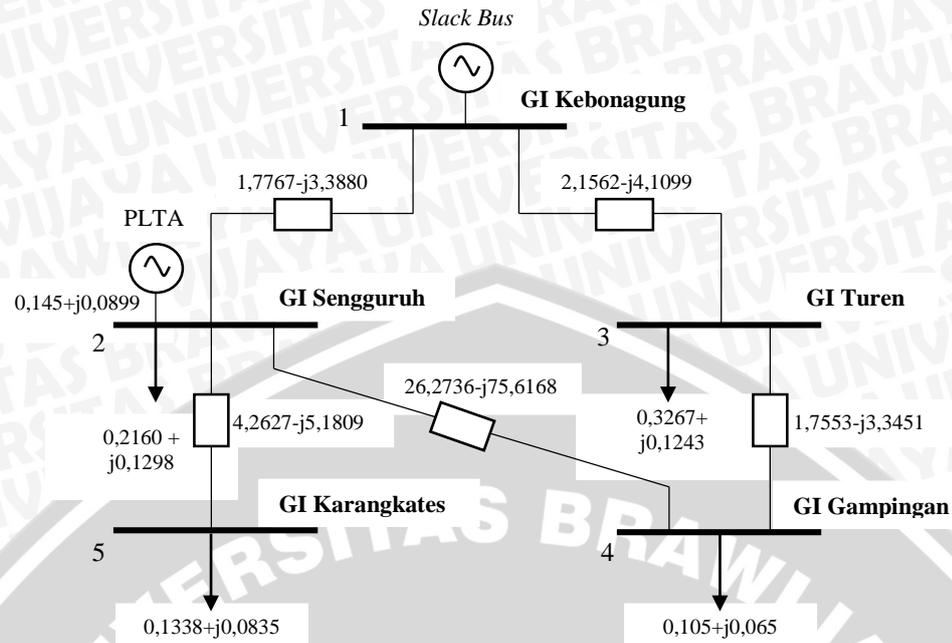


Gambar 4.3 *Single Line Diagram* Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh- GI Kebonagung dalam besaran per unit

Dari data diatas, kemudian dapat disusun Y_{bus} sesuai dengan rumus dibawah ini.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix}$$

Gambar 4.4 menunjukkan *single line diagram* sistem transmisi 70kV GI Kebonagung - PLTA Sengguruh dengan berbagai beban terpasang pada masing- masing gardu induk beserta saluran impedansinya yang telah dirubah dalam bentuk admitansi.



Gambar 4.4 *Single Line Diagram* Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung dengan saluran transmisi dalam bentuk admitansi

Dari gambar 4.4 diatas, maka dapat disusun matriks Y_{bus} sebagai berikut :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 3,9328 - j7,4978 & -1,7767 + j3,3880 & -2,1562 + j4,1099 & 0 & 0 \\ -1,7767 + j3,3880 & 32,3130 - j84,1857 & 0 & -26,2736 + j75,6168 & -4,2627 + j5,1809 \\ -2,1562 + j4,1099 & 0 & 3,9115 - j7,4550 & -1,7553 + j3,3451 & 0 \\ 0 & -26,2736 + j75,6168 & -1,7553 + j3,3451 & 28,0290 - j78,9619 & 0 \\ 0 & -4,2627 + j5,1809 & 0 & 0 & 4,2627 - j5,1809 \end{bmatrix}$$

Atau bisa dinyatakan dalam bentuk polar

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 8,4667 \angle -1,0877 & 3,8255 \angle 2,0538 & 4,6412 \angle 2,0540 & 0 & 0 \\ 3,8255 \angle 2,0538 & 90,1740 \angle -1,2043 & 0 & 80,0512 \angle 1,9052 & 6,7091 \angle 2,2593 \\ 4,6412 \angle 2,0540 & 0 & 8,4188 \angle -1,0876 & 3,7777 \angle 2,0540 & 0 \\ 0 & 80,0512 \angle 1,9052 & 3,7777 \angle 2,0540 & 83,7890 \angle -1,2297 & 0 \\ 0 & 6,7091 \angle 2,2593 & 0 & 0 & 6,7091 \angle -0,8823 \end{bmatrix}$$

Catatan : sudut dalam bentuk radian

Penyelesaian analisis aliran daya untuk mendapat tegangan dan rugi daya sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung dapat diselesaikan sesuai dengan pembahasan pada subbab 2.8.4 dan gambar 2.10.

Langkah 1, adalah memisalkan semua tegangan adalah 1,0 pu

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \end{bmatrix}$$

Langkah 2, menghitung P dan Q sesuai rumus dibawah ini, serta memeriksa perubahan daya. Apabila telah memenuhi ketelitian, maka berhenti dan jika belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan ke langkah 3 dengan membuat matriks jacobian.

$$P_i = \sum_{k=1}^n |E_i| |E_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \theta_k - \theta_i)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |E_i| |E_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \theta_k - \theta_i)$$

$$\begin{aligned} P_{2\text{hitung}}^{(0)} &= (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_2 \cdot Y_{22}) \cos(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &\quad + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= (1.1.3,8255) \cos(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.90,1740) \cos(-1,2043 + 0 - 0) + \\ &\quad (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) \\ &= -1,6876 \cdot 10^{-14} \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{2\text{hitung}}^{(0)} &= (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_2 \cdot Y_{22}) \sin(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &\quad + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= (1.1.3,8255) \sin(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.90,1740) \sin(-1,2043 + 0 - 0) + \\ &\quad (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) \\ &= 1,3323 \cdot 10^{-14} \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{3\text{hitung}}^{(0)} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_3 \cdot Y_{33}) \cos(\theta_{33} + \delta_3 - \delta_3) \\ &\quad + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= (1.1.4,6412) \cos(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.8,4188) \cos(-1,0876 + 0 - 0) \\ &\quad + (1.1.3,7777) \cos(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 6,6613 \cdot 10^{-16} \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{3\text{hitung}}^{(0)} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_3 \cdot Y_{33}) \sin(\theta_{33} + \delta_3 - \delta_3) \\ &\quad + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= (1.1.4,6412) \sin(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.8,4188) \sin(-1,0876 + 0 - 0) \\ &\quad + (1.1.3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= -8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{4\text{hitung}}^{(0)} &= (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \cos(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \cos(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \cos(\theta_{43} + \delta_3 - \delta_4) \\ &\quad + (E_4 \cdot E_4 \cdot Y_{44}) \cos(\theta_{44} + \delta_4 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \end{aligned}$$

$$= (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \cos(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.83,7890) \cos(-1,2297 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0)$$

$$= -2,1316 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$Q_{4\text{hitung}}^{(0)} = (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \sin(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \sin(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \sin(\theta_{43} + \delta_3 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_4 \cdot Y_{44}) \sin(\theta_{44} + \delta_4 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4)$$

$$= (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.83,7890) \sin(-1,2297 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0)$$

$$= 2,8422 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$P_{5\text{hitung}}^{(0)} = (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \cos(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \cos(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \cos(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \cos(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_5 \cdot Y_{55}) \cos(\theta_{55} + \delta_5 - \delta_5)$$

$$= (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \cos(-0,8823 + 0 - 0)$$

$$= 8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

$$Q_{5\text{hitung}}^{(0)} = (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \sin(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \sin(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \sin(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \sin(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_5 \cdot Y_{55}) \sin(\theta_{55} + \delta_5 - \delta_5)$$

$$= (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \sin(-0,8823 + 0 - 0)$$

$$= -8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

Memeriksa perubahan daya

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2 - P_{2\text{hitung}}^{(0)} = -0,0710$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_2 - Q_{2\text{hitung}}^{(0)} = -0,0399$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3 - P_{3\text{hitung}}^{(0)} = -0,3267$$

$$\Delta Q_3^{(0)} = Q_3 - Q_{3\text{hitung}}^{(0)} = 0,1243$$

$$\Delta P_4^{(0)} = P_4 - P_{4\text{hitung}}^{(0)} = -0,1050$$

$$\Delta Q_4^{(0)} = Q_4 - Q_{4\text{hitung}}^{(0)} = -0,0650$$

$$\Delta P_5^{(0)} = P_5 - P_{5\text{hitung}}^{(0)} = -0,1338$$

$$\Delta Q_5^{(0)} = Q_5 - Q_{5\text{hitung}}^{(0)} = -0,0835$$

Karena perubahan daya belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan ke langkah berikutnya.

Langkah 3, yaitu menentukan elemen-elemen matrik jakobian dengan menggunakan tabel (2.3)

➤ Matriks H

$$H_{22} = (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2)$$

$$= (1.1.3,8255) \sin(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0)$$

$$= 84,1857$$

$$\begin{aligned}
 H_{23} &= -(E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\
 &= -(1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{24} &= -(E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) \\
 &= -(1.1.80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) \\
 &= -75,6168
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{25} &= -(E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\
 &= -(1.1.6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) \\
 &= -5,1809
 \end{aligned}$$

$$H_{32} = H_{23} = 0$$

$$\begin{aligned}
 H_{33} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\
 &= (1.1.4,6412) \sin(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 7,4550
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{34} &= -(E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) \\
 &= -(1.1.3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) \\
 &= -3,3451
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{35} &= -(E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\
 &= -(1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$H_{42} = H_{24} = -75,6168$$

$$H_{43} = H_{34} = -3,3451$$

$$\begin{aligned}
 H_{44} &= (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \sin(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \sin(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \sin(\theta_{43} + \delta_3 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\
 &= (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 78,9619
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{45} &= -(E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\
 &= -(1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$H_{52} = H_{25} = -5,1809$$

$$H_{53} = H_{35} = 0$$

$$H_{54} = H_{45} = 0$$

$$\begin{aligned}
 H_{55} &= (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \sin(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \sin(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \sin(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \sin(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) \\
 &= (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\
 &= 5,1809
 \end{aligned}$$

➤ Matriks N

$$\begin{aligned} N_{22} &= 2(E_2 \cdot Y_{22}) \cos \theta_{22} + (E_1 \cdot Y_{21}) \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_3 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + \\ &\quad (E_4 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot V_5 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= 2(1,90,1740) \cos(-1,2043) + (1,3,8255) \cos(2,0538 + 0 - 0) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 32,3130 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{23} &= (E_2 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &= (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{24} &= (E_2 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) \\ &= (1,80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) \\ &= -26,2736 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{25} &= (E_2 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= (1,6,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) \\ &= -4,2628 \end{aligned}$$

$$N_{32} = N_{23} = 0$$

$$\begin{aligned} N_{33} &= 2(E_3 \cdot Y_{33}) \cos \theta_{33} + (E_1 \cdot Y_{31}) \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_2 \cdot Y_{32}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot V_5 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= 2(1,8,4188) \cos(-1,0876) + (1,4,6412) \cos(2,0540 + 0 - 0) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,3,7777) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 3,9115 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{34} &= (E_3 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) \\ &= (1,3,7777) \cos(2,0540 + 0 - 0) \\ &= -1,7553 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{35} &= (E_3 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$N_{42} = N_{24} = -26,2736$$

$$N_{43} = N_{34} = -1,7553$$

$$\begin{aligned} N_{44} &= 2(E_4 \cdot Y_{44}) \cos \theta_{44} + (E_1 \cdot Y_{41}) \cos(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_2 \cdot Y_{42}) \cos(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{43}) \cos(\theta_{43} + \delta_3 - \delta_4) + (E_5 \cdot V_4 \cdot Y_{54}) \cos(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) \\ &= 2(1,83,7890) \cos(-1,2297) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) + (1,80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,2,0540) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 28,0290 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{45} &= (E_4 \cdot Y_{45}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= (1,0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$N_{52} = N_{25} = -4,2627$$

$$N_{53} = N_{35} = 0$$

$$N_{54} = N_{45} = 0$$

$$\begin{aligned} N_{55} &= 2(E_5 \cdot Y_{55}) \cos \theta_{55} + (E_1 \cdot Y_{51}) \cos(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_2 \cdot Y_{52}) \cos(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{53}) \cos(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) + (E_4 \cdot Y_{54}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= 2(1.6,7091) \cos(-0,8823) + (1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (16,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) + \\ &\quad (1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 4,2627 \end{aligned}$$

➤ Matriks J

$$\begin{aligned} J_{22} &= (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \\ &\quad \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= (1.1.3,8255) \cos(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \cos(1,9052 + \\ &\quad 0 - 0) + (1.1.6,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) \\ &= -32,3130 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{23} &= -(E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &= -(1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{24} &= -(E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) \\ &= -(1.1.80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) \\ &= 26,2736 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{25} &= -(E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= -(1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 4,2627 \end{aligned}$$

$$J_{32} = J_{23} = 0$$

$$\begin{aligned} J_{33} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \\ &\quad \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= (1.1.4,6412) \cos(2,0583 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \cos(2,0540 + \\ &\quad 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= -3,9115 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{34} &= -(E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) \\ &= -(1.1.3,7777) \cos(2,0540 + 0 - 0) \\ &= 1,7553 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{35} &= -(E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= -(1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$J_{42} = J_{24} = 26,2736$$

$$J_{43} = J_{34} = 1,7553$$

$$\begin{aligned} J_{44} &= (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \cos(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \cos(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \cos(\theta_{43} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.80,0512) \cos(1,9052 + 0 - 0) + (1.1.3,7777) \cos(2,0540 + \\ &\quad 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \end{aligned}$$

$$= -28,0290$$

$$\begin{aligned} J_{45} &= -(E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= -(1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{51} &= -(E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \cos(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) \\ &= -(1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$J_{52} = J_{25} = 4,2628$$

$$J_{53} = J_{35} = 0$$

$$J_{54} = J_{45} = 0$$

$$\begin{aligned} J_{55} &= (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \cos(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \cos(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \cos(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) \\ &\quad + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \cos(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) \\ &= (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + (1.1.6,7091) \cos(2,2593 + 0 - 0) + (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) + \\ &\quad (1.1.0) \cos(0 + 0 - 0) \\ &= -4,2627 \end{aligned}$$

➤ **Matriks L**

$$\begin{aligned} L_{22} &= 2(E_2 \cdot Y_{22}) \sin \theta_{22} + (E_1 \cdot Y_{21}) \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_3 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + \\ &\quad (E_4 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot V_5 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= 2(1,90,1740) \sin(-1,2043) + (1,3,8255) \cos(2,0538 + 0 - 0) + (1,0) \sin(0 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1,0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 84,1857 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{23} &= (E_2 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) \\ &= (1,0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{24} &= (E_2 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) \\ &= (1,80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) \\ &= -75,6168 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{25} &= (E_2 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= (1,6,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) \\ &= -5,1809 \end{aligned}$$

$$L_{32} = L_{23} = 0$$

$$\begin{aligned} L_{33} &= 2(E_3 \cdot Y_{33}) \sin \theta_{33} + (E_1 \cdot Y_{31}) \sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_2 \cdot Y_{32}) \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= 2(1,8,4188) \sin(-1,0876) + (1,4,6412) \sin(2,0540 + 0 - 0) + (1,0) \sin(0 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,3,7777) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1,0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 7,4550 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{34} &= (E_3 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) \\ &= (1,3,7777) \sin(2,0540 + 0 - 0) \\ &= -3,3451 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{35} &= (E_3 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= (1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$L_{42} = L_{24} = -75,6168$$

$$L_{43} = L_{34} = -3,3451$$

$$\begin{aligned} L_{44} &= 2(E_4 \cdot Y_{44}) \sin \theta_{44} + (E_1 \cdot Y_{41}) \sin(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_2 \cdot Y_{42}) \sin(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{43}) \sin(\theta_{43} + \delta_3 - \delta_4) + (E_5 \cdot V_4 \cdot Y_{54}) \sin(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) \\ &= 2(1,83,7890) \sin(-1,2297) + (1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1,80,0512) \sin(1,9052 + 0 - 0) + \\ &\quad (1,2,0540) \sin(1,9052 + 0 - 0) + (1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 78,9619 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{45} &= (E_4 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= (1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$L_{52} = L_{25} = -5,1809$$

$$L_{53} = L_{35} = 0$$

$$L_{54} = L_{45} = 0$$

$$\begin{aligned} L_{55} &= 2(E_5 \cdot Y_{55}) \sin \theta_{55} + (E_1 \cdot Y_{51}) \sin(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_2 \cdot Y_{52}) \sin(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + \\ &\quad (E_3 \cdot Y_{53}) \sin(\theta_{53} + \delta_3 - \delta_5) + (E_4 \cdot V_5 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= 2(1,6,7091) \sin(-0,8823) + (1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (16,7091) \sin(2,2593 + 0 - 0) + \\ &\quad (1.0) \sin(0 + 0 - 0) + (1.0) \sin(0 + 0 - 0) \\ &= 5,19809 \end{aligned}$$

$$Jacobian = \begin{bmatrix} H & J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} \\ N_{22} & N_{23} & N_{24} & N_{25} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} \\ N_{32} & N_{33} & N_{34} & N_{35} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} \\ N_{42} & N_{43} & N_{44} & N_{45} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} \\ N_{52} & N_{52} & N_{52} & N_{52} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_2}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_3}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_4}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_5}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_5}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_5}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_2}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_3}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_4}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_5}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_5}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_5}{\partial E_5} \end{bmatrix}$$

$$Jacobian = \begin{bmatrix} 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 & 32,3130 & 0,0000 & -26,2736 & -4,2627 \\ 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 & 0,0000 & 3,9115 & -1,7553 & 0,0000 \\ -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 & -26,2736 & -1,7553 & 28,0290 & 0,0000 \\ -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 & -4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & 4,2627 \\ -32,3130 & 0,0000 & 26,2736 & 4,2627 & 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 \\ 0,0000 & -3,9115 & 1,7553 & 0,0000 & 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 \\ 26,2736 & 1,7553 & -28,0290 & 0,0000 & -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 \\ 4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & -4,2627 & -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 \end{bmatrix}$$

Langkah 4, adalah menyelesaikan persamaan linier (2.37) untuk memperoleh perubahan besar dan sudut tegangan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Dengan $[J]^{-1}$ adalah

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,1513 & -0,0791 & -0,0349 & -0,0777 & -0,0791 \\ 0,0661 & 0,1363 & 0,0694 & 0,0661 & -0,0349 & -0,0714 & -0,0360 & -0,0349 \\ 0,1472 & 0,0694 & 0,1548 & 0,1472 & -0,0777 & -0,0360 & -0,0803 & -0,0777 \\ 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,2664 & -0,0791 & -0,0349 & -0,0777 & -0,1738 \\ 0,0791 & 0,0349 & 0,0777 & 0,0791 & 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,1513 \\ 0,0349 & 0,0714 & 0,0360 & 0,0349 & 0,0661 & 0,1363 & 0,0694 & 0,0661 \\ 0,0777 & 0,0360 & 0,0803 & 0,0777 & 0,1472 & 0,0694 & 0,1548 & 0,1472 \\ 0,0791 & 0,0349 & 0,0777 & 0,1738 & 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,2664 \end{bmatrix}$$

Maka,

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta\delta_4^{(0)} \\ \Delta\delta_5^{(0)} \\ \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} \\ \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} \\ \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} \\ \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,1513 & -0,0791 & -0,0349 & -0,0777 & -0,0791 \\ 0,0661 & 0,1363 & 0,0694 & 0,0661 & -0,0349 & -0,0714 & -0,0360 & -0,0349 \\ 0,1472 & 0,0694 & 0,1548 & 0,1472 & -0,0777 & -0,0360 & -0,0803 & -0,0777 \\ 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,2664 & -0,0791 & -0,0349 & -0,0777 & -0,1738 \\ 0,0791 & 0,0349 & 0,0777 & 0,0791 & 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,1513 \\ 0,0349 & 0,0714 & 0,0360 & 0,0349 & 0,0661 & 0,1363 & 0,0694 & 0,0661 \\ 0,0777 & 0,0360 & 0,0803 & 0,0777 & 0,1472 & 0,0694 & 0,1548 & 0,1472 \\ 0,0791 & 0,0349 & 0,0777 & 0,1738 & 0,1513 & 0,0661 & 0,1472 & 0,2664 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta P_5^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \\ \Delta Q_4^{(0)} \\ \Delta Q_5^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0481 \\ -0,0495 \\ -0,0490 \\ -0,0556 \\ -0,0718 \\ -0,0637 \\ -0,0725 \\ -0,0940 \end{bmatrix}$$

Langkah 5, adalah melakukan perbaikan tegangan sesuai persamaan 2.54 dan 2.55. Perbaikan tegangannya adalah :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0,0481) = -0,0481$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0,0495) = -0,0495$$

$$\delta_4^{(1)} = \delta_4^{(0)} + \Delta\delta_4^{(0)} = 0 + (-0,0490) = -0,0490$$

$$\delta_5^{(1)} = \delta_5^{(0)} + \Delta\delta_5^{(0)} = 0 + (-0,0556) = -0,0556$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(0)} + \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} x E_2^{(0)} = 1 + (-0,0718)x1 = 0,9282$$

$$E_3^{(1)} = E_3^{(0)} + \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} x E_3^{(0)} = 1 + (-0,0637)x1 = 0,9363$$

$$E_4^{(1)} = E_4^{(0)} + \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} x E_4^{(0)} = 1 + (-0,0725)x1 = 0,9275$$

$$E_5^{(1)} = E_5^{(0)} + \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} x E_5^{(0)} = 1 + (-0,0718)x1 = 0,9060$$

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \cos \delta_2 + E_2 \sin \delta_2 \\ E_3 \cos \delta_3 + E_3 \sin \delta_3 \\ E_4 \cos \delta_4 + E_4 \sin \delta_4 \\ E_5 \cos \delta_5 + E_5 \sin \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9267 - j0,0453 \\ 0,9350 - j0,0467 \\ 0,9259 - j0,0462 \\ 0,9041 - j0,0510 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9278 \angle -0,0489 \\ 0,9361 \angle -0,0499 \\ 0,9270 \angle -0,0498 \\ 0,9055 \angle -0,0564 \end{bmatrix}$$

Kemudian setelah mendapat hasil besar dan sudut tegangan, kembali ke langkah 2

$$\begin{aligned} P_{2\text{hitung}}^{(1)} &= (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_2 \cdot Y_{22}) \cos(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \cos(\theta_{23} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \cos(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \cos(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= -0,0718 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{2\text{hitung}}^{(1)} &= (E_2 \cdot E_1 \cdot Y_{21}) \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_2 \cdot Y_{22}) \sin(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_3 \cdot Y_{23}) \sin(\theta_{23} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_4 \cdot Y_{24}) \sin(\theta_{24} + \delta_4 - \delta_2) + (E_2 \cdot E_5 \cdot Y_{25}) \sin(\theta_{25} + \delta_5 - \delta_2) \\ &= -0,0287 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{3\text{hitung}}^{(1)} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_3 \cdot Y_{33}) \cos(\theta_{33} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \cos(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \cos(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= -0,3032 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{3\text{hitung}}^{(1)} &= (E_3 \cdot E_1 \cdot Y_{31}) \sin(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_2 \cdot Y_{32}) \sin(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_3 \cdot Y_{33}) \sin(\theta_{33} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_4 \cdot Y_{34}) \sin(\theta_{34} + \delta_4 - \delta_3) + (E_3 \cdot E_5 \cdot Y_{35}) \sin(\theta_{35} + \delta_5 - \delta_3) \\ &= -0,1116 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{4\text{hitung}}^{(1)} &= (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \cos(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \cos(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \cos(\theta_{43} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_4 \cdot Y_{44}) \cos(\theta_{44} + \delta_4 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \cos(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= -0,0927 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{4\text{hitung}}^{(1)} &= (E_4 \cdot E_1 \cdot Y_{41}) \sin(\theta_{41} + \delta_1 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_2 \cdot Y_{42}) \sin(\theta_{42} + \delta_2 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_3 \cdot Y_{43}) \sin(\theta_{43} + \delta_3 - \\ &\quad \delta_4) + (E_4 \cdot E_4 \cdot Y_{44}) \sin(\theta_{44} + \delta_4 - \delta_4) + (E_4 \cdot E_5 \cdot Y_{45}) \sin(\theta_{45} + \delta_5 - \delta_4) \\ &= -0,0618 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{5\text{hitung}}^{(1)} &= (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \cos(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \cos(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \cos(\theta_{53} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \cos(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_5 \cdot Y_{55}) \cos(\theta_{55} + \delta_5 - \delta_5) \\ &= -0,1185 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{5\text{hitung}}^{(1)} &= (E_5 \cdot E_1 \cdot Y_{51}) \sin(\theta_{51} + \delta_1 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_2 \cdot Y_{52}) \sin(\theta_{52} + \delta_2 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_3 \cdot Y_{53}) \sin(\theta_{53} + \\ &\quad \delta_3 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_4 \cdot Y_{54}) \sin(\theta_{54} + \delta_4 - \delta_5) + (E_5 \cdot E_5 \cdot Y_{55}) \sin(\theta_{55} + \delta_5 - \delta_5) \\ &= -0,0776 \text{ pu} \end{aligned}$$

Memeriksa perubahan daya

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2 - P_{2\text{hitung}}^{(1)} = 0,0008$$

$$\Delta P_2^{(1)} = Q_2 - Q_{2\text{hitung}}^{(1)} = -0,0112$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3 - P_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,0235$$

$$\Delta P_3^{(1)} = Q_3 - Q_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,0127$$

$$\Delta P_4^{(1)} = P_4 - P_{4\text{hitung}}^{(1)} = -0,0123$$

$$\Delta P_4^{(1)} = Q_4 - Q_{4\text{hitung}}^{(1)} = -0,0032$$

$$\Delta P_5^{(1)} = P_5 - P_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,0153$$

$$\Delta P_5^{(1)} = Q_5 - Q_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,0059$$

Karena perubahan daya belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan iterasi ke langkah berikutnya hingga konvergen, dimana seluruh elemen perubahan daya memenuhi

ketelitian. Perhitungan mengalami konvergen pada iterasi ke-5 dimana hasil akhirnya sebagai berikut :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9181 - j0,0488 \\ 0,9278 - j0,0501 \\ 0,9172 - j0,0498 \\ 0,8927 - j0,0557 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9194 \angle -0,0532 \\ 0,9292 \angle -0,0539 \\ 0,9186 \angle -0,0542 \\ 0,8944 \angle -0,0623 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 61,97 \angle -0,0532 \\ 62,62 \angle -0,0539 \\ 61,91 \angle -0,0542 \\ 60,28 \angle -0,0623 \end{bmatrix}$$

Sudut dalam matriks diatas adalah dalam bentuk radian, bisa juga dinyatakan dalam bentuk derajat sehingga :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 61,97 \angle -3,05 \\ 62,62 \angle -3,09 \\ 61,91 \angle -3,11 \\ 60,28 \angle -3,57 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapat hasil akhir tegangan tiap bus, maka dapat dihitung arus dan daya masing- masing bus :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6725 - j0,3793 \\ -0,0748 + j0,0474 \\ -0,3439 + j0,1525 \\ -0,1103 + j0,0769 \\ -0,1435 + j0,1025 \end{bmatrix}$$

$$S_{bus} = I_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6725 + j0,3793 \\ -0,0710 - j0,0399 \\ -0,3267 - j0,1243 \\ -0,1050 - j0,0650 \\ -0,1338 - j0,0835 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,25 + j37,93 \\ -7,10 - j3,99 \\ -32,67 - j12,43 \\ -10,50 - j6,50 \\ -13,38 - j8,35 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

Sehingga didapat total rugi daya sebesar $0,0360 + j0,0666$ pu atau sebesar 3,60 MW dan 6,66 MVAR.

Rekapitulasi hasil perhitungan tegangan dan rugi daya menggunakan metode Newton Raphson disajikan pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan pada kondisi sekarang

Gardu Induk	Tegangan		Pembangkitan		Pembebanan	
	kV	sudut	MW	MVAR	MW	MVAR
Kebonagung	67,40	0,00	67,25	37,93	-	-
Sengguruh	61,97	-3,05	14,50	8,99	21,60	12,98
Turen	62,62	-3,09	0,00	0,00	32,67	12,43
Gampingan	61,91	-3,11	0,00	0,00	10,50	6,50
Karangkates	60,28	-3,57	0,00	0,00	13,38	8,35
Total Rugi Daya			3,60 + j6,66 MVA			

Dari tabel dapat terlihat bahwa pada kondisi saat ini, sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung mengalami jatuh tegangan yang melebihi toleransi tegangan

yang ditetapkan oleh PLN, yaitu sebesar +5% s/d -10%. Hal ini yang perlu diperbaiki agar sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Karangates tetap memenuhi toleransi jatuh tegangan yang telah ditetapkan sebesar +5% s/d -10% atau dalam besaran kV sebesar 73,5 s/d 63 kV.

4.4 Upaya Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya Sistem Transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung

Upaya perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung bisa dilakukan melalui injeksi daya reaktif yang berupa pemasangan kapasitor. Penentuan lokasi dan besarnya injeksi daya reaktif untuk memperbaiki tegangan sistem transmisi 70kV PLTA Sengguruh-GI Kebonagung ini tidak dapat dilakukan secara terpisah, akan tetapi juga harus ikut melibatkan bus lain dalam sistem transmisi 70kV tersebut. Hal ini dikarenakan adanya injeksi daya reaktif yang berupa kapasitor pada salah satu bus dalam sistem transmisi ini akan menyebabkan kenaikan tegangan pada bus-bus lain yang berada dalam sistem.

Penentuan lokasi dan besarnya injeksi daya reaktif ini dapat diselesaikan dengan cara melakukan perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton Raphson, dimana gardu induk yang akan diinjeksikan daya reaktif akan diperlakukan sebagai PV Bus, dimana gardu induk yang berstatus PV Bus ini akan ditetapkan besarnya daya nyata dan tegangannya. Untuk mempertahankan tegangan pada bus ini, dilakukan dengan cara mengatur besarnya injeksi daya reaktif pada bus tersebut.

Perhitungan tegangan dan rugi daya sistem melalui injeksi daya reaktif yang berupa kapasitor hampir sama dengan perhitungan pada subbab 4.3.3, hanya saja terdapat perbedaan pada penyusunan matriks Jacobian-nya. Untuk perhitungan lengkapnya akan dijelaskan pada masing- masing subbab dibawah ini.

4.4.1 Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Sengguruh

Injeksi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor di Gardu Induk Sengguruh dilakukan dengan cara mengubah Gardu Induk Sengguruh yang awalnya merupakan PQ Bus menjadi PV Bus, yang mana akan dijaga besarnya daya nyata dan tegangannya. Dengan melakukan perhitungan aliran daya dapat diperoleh informasi besarnya tegangan, sudut tegangan, serta daya masing- masing gardu induk seperti yang disajikan pada tabel 4.4. Penyelesaiannya adalah sebagai berikut.

Langkah 1, adalah memisalkan semua tegangan adalah 1,0 pu

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \\ 1,0 \angle 0 \end{bmatrix}$$

Langkah 2, menghitung P dan Q sesuai rumus dibawah ini, serta memeriksa perubahan daya. Apabila telah memenuhi ketelitian, maka berhenti dan jika belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan ke langkah 3 dengan membuat matriks jacobian.

$$P_{2hitung}^{(0)} = -1,6876 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$Q_{2hitung}^{(0)} = 1,3323 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$P_{3hitung}^{(0)} = 6,6613 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

$$Q_{3hitung}^{(0)} = -8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

$$P_{4hitung}^{(0)} = -2,1316 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$Q_{4hitung}^{(0)} = 2,8422 \cdot 10^{-14} \text{ pu}$$

$$P_{5hitung}^{(0)} = 8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

$$Q_{5hitung}^{(0)} = -8,8818 \cdot 10^{-16} \text{ pu}$$

Memeriksa perubahan daya

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2 - P_{2hitung}^{(0)} = -0,0710$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_2 - Q_{2hitung}^{(0)} = -0,0399$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3 - P_{3hitung}^{(0)} = -0,3267$$

$$\Delta Q_3^{(0)} = Q_3 - Q_{3hitung}^{(0)} = 0,1243$$

$$\Delta P_4^{(0)} = P_4 - P_{4hitung}^{(0)} = -0,1050$$

$$\Delta Q_4^{(0)} = Q_4 - Q_{4hitung}^{(0)} = -0,0650$$

$$\Delta P_5^{(0)} = P_5 - P_{5hitung}^{(0)} = -0,1338$$

$$\Delta Q_5^{(0)} = Q_5 - Q_{5hitung}^{(0)} = -0,0835$$

Karena perubahan daya belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan ke langkah berikutnya.

Langkah 3, yaitu menentukan elemen-elemen matrik jacobian dengan menggunakan tabel (2.3). Karena Gardu Induk Sengguruh (bus 2) merupakan PV Bus, matriks Jacobian yang awalnya 8x8 seperti pada subbab 4.3.3 menjadi 7x7, seperti berikut.

$$\text{Jacobian} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_2}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_3}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial P_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial P_5}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_5}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_3}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial Q_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_5} & E_3 \frac{\partial Q_5}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_5}{\partial E_5} \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 & 0,0000 & -26,2736 & -4,2627 \\ 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 & 3,9115 & -1,7553 & 0,0000 \\ -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 & -1,7553 & 28,0290 & 0,0000 \\ -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 & 0,0000 & 0,0000 & 4,2627 \\ 0,0000 & -3,9115 & 1,7553 & 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 \\ 26,2736 & 1,7553 & -28,0290 & 0,0000 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 \\ 4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & -4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 \end{bmatrix}$$

Langkah 4, adalah menyelesaikan persamaan linier (2.37) untuk memperoleh perubahan besar dan sudut tegangan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta E}{E} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta E}{E} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta E}{E} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Dengan $[J]^{-1}$ adalah

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,1927 & 0,0843 & 0,1879 & 0,1927 & -0,0003 & -0,0007 & -0,0000 \\ 0,0843 & 0,1444 & 0,0873 & 0,0843 & -0,0561 & -0,0021 & -0,0000 \\ 0,1879 & 0,0873 & 0,1946 & 0,1879 & -0,0021 & -0,0047 & -0,0000 \\ 0,1927 & 0,0843 & 0,1879 & 0,3078 & -0,0003 & -0,0007 & -0,0947 \\ 0,0003 & 0,0561 & 0,0021 & 0,0003 & 0,1075 & 0,0052 & 0,0000 \\ 0,0007 & 0,0021 & 0,0047 & 0,0007 & 0,0052 & 0,0115 & 0,0000 \\ -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0947 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1151 \end{bmatrix}$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta\delta_4^{(0)} \\ \Delta\delta_5^{(0)} \\ \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} \\ \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} \\ \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1927 & 0,0843 & 0,1879 & 0,1927 & -0,0003 & -0,0007 & -0,0000 \\ 0,0843 & 0,1444 & 0,0873 & 0,0843 & -0,0561 & -0,0021 & -0,0000 \\ 0,1879 & 0,0873 & 0,1946 & 0,1879 & -0,0021 & -0,0047 & -0,0000 \\ 0,1927 & 0,0843 & 0,1879 & 0,3078 & -0,0003 & -0,0007 & -0,0947 \\ 0,0003 & 0,0561 & 0,0021 & 0,0003 & 0,1075 & 0,0052 & 0,0000 \\ 0,0007 & 0,0021 & 0,0047 & 0,0007 & 0,0052 & 0,0115 & 0,0000 \\ -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0947 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1151 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta P_5^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \\ \Delta Q_4^{(0)} \\ \Delta Q_5^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0867 \\ -0,0665 \\ -0,0869 \\ -0,0941 \\ -0,0323 \\ -0,0027 \\ -0,0223 \end{bmatrix}$$

Langkah 5, adalah melakukan perbaikan tegangan sesuai persamaan 2.54 dan 2.55.

Perbaikan tegangannya adalah :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0,0867) = -0,0867$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0,0665) = -0,0665$$

$$\delta_4^{(1)} = \delta_4^{(0)} + \Delta\delta_4^{(0)} = 0 + (-0,0869) = -0,0869$$

$$\delta_5^{(1)} = \delta_5^{(0)} + \Delta\delta_5^{(0)} = 0 + (-0,0941) = -0,0941$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(0)} = 1$$

$$E_3^{(1)} = E_3^{(0)} + \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} x E_3^{(0)} = 1 + (-0,0323)x1 = 0,9677$$

$$E_4^{(1)} = E_4^{(0)} + \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} x E_4^{(0)} = 1 + (-0,0027)x1 = 0,9973$$

$$E_5^{(1)} = E_5^{(0)} + \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} x E_5^{(0)} = 1 + (-0,0223)x1 = 0,9777$$

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \cos \delta_2 + E_2 \sin \delta_2 \\ E_3 \cos \delta_3 + E_3 \sin \delta_3 \\ E_4 \cos \delta_4 + E_4 \sin \delta_4 \\ E_5 \cos \delta_5 + E_5 \sin \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9962 - j0,0865 \\ 0,9655 - j0,0643 \\ 0,9935 - j0,0865 \\ 0,9734 - j0,0919 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 1 \angle -0,0867 \\ 0,9677 \angle -0,0665 \\ 0,9973 \angle -0,0869 \\ 0,9777 \angle -0,0941 \end{bmatrix}$$

Kemudian setelah mendapat hasil besar dan sudut tegangan, kembali ke langkah 2

$$P_{2hitung}^{(1)} = -0,0648 \text{ pu}$$

$$Q_{2hitung}^{(1)} = 0,4507 \text{ pu}$$

$$P_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,3111 \text{ pu}$$

$$Q_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,1109 \text{ pu}$$

$$P_{4\text{hitung}}^{(1)} = -0,1022 \text{ pu}$$

$$Q_{4\text{hitung}}^{(1)} = -0,0653 \text{ pu}$$

$$P_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,1307 \text{ pu}$$

$$Q_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,0815 \text{ pu}$$

Memeriksa perubahan daya

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2 - P_{2\text{hitung}}^{(1)} = -0,0062$$

$$\Delta Q_2^{(1)} = Q_2 - Q_{2\text{hitung}}^{(1)} = -0,4906$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3 - P_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,0115$$

$$\Delta Q_3^{(1)} = Q_3 - Q_{3\text{hitung}}^{(1)} = -0,0135$$

$$\Delta P_4^{(1)} = P_4 - P_{4\text{hitung}}^{(1)} = -0,0028$$

$$\Delta Q_4^{(1)} = Q_4 - Q_{4\text{hitung}}^{(1)} = 0,0003$$

$$\Delta P_5^{(1)} = P_5 - P_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,0031$$

$$\Delta Q_5^{(1)} = Q_5 - Q_{5\text{hitung}}^{(1)} = -0,0020$$

Karena perubahan daya belum memenuhi ketelitian, maka dilanjutkan iterasi ke langkah berikutnya hingga konvergen, dimana seluruh elemen perubahan daya memenuhi ketelitian. Perhitungan mengalami konvergen pada iterasi ke-4 dimana hasil akhirnya sebagai berikut :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9959 - j0,0906 \\ 0,9627 - j0,0668 \\ 0,9930 - j0,0905 \\ 0,9724 - j0,0959 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 1 \angle -0,0867 \\ 0,9651 \angle -0,0907 \\ 0,9971 \angle -0,0693 \\ 0,9772 \angle -0,0983 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 67,4 \angle -0,0867 \\ 65,04 \angle -0,0907 \\ 67,21 \angle -0,0693 \\ 65,86 \angle -0,0983 \end{bmatrix}$$

Sudut dalam matriks diatas adalah dalam bentuk radian, bisa juga dinyatakan dalam bentuk derajat sehingga :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 67,4 \angle -5,20 \\ 65,04 \angle -3,97 \\ 67,21 \angle -5,21 \\ 65,86 \angle -5,63 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapat hasil akhir tegangan tiap bus, maka dapat dihitung arus dan daya masing- masing bus :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6690 + j0,1379 \\ -0,1134 + j0,4628 \\ -0,3288 + j0,1520 \\ -0,0989 + j0,0745 \\ -0,1279 + j0,0985 \end{bmatrix}$$

$$S_{bus} = I_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6690 - j0,1379 \\ -0,0710 + j0,4712 \\ -0,3267 - j0,1243 \\ -0,1050 - j0,0650 \\ -0,1338 - j0,0835 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66,90 + j13,79 \\ -7,10 + j47,12 \\ -32,67 - j12,43 \\ -10,50 - j6,50 \\ -13,38 - j8,35 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

Sehingga didapat total rugi daya sebesar $0,0325+j0,0605$ pu atau sebesar 3,25 MW dan 6,05 MVAR.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Sengguruh

Gardu Induk	Tegangan		Pembangkitan		Pembebanan	
	kV	sudut	MW	MVAR	MW	MVAR
Kebonagung	67,40	0,00	66,90	-13,79	-	-
Sengguruh	67,40	-5,20	14,50	60,10	21,60	12,98
Turen	65,04	-3,97	0,00	0,00	32,67	12,43
Gampingan	67,21	-5,21	0,00	0,00	10,50	6,50
Karangkates	65,86	-5,63	0,00	0,00	13,38	8,35
Total Rugi Daya			3,25 + j6,05 MVA			

Injeksi daya reaktif dengan pemasangan kapasitor yang dibutuhkan di GI Sengguruh adalah sebesar 51,11 MVA. Pemasangan kapasitor sebesar 51,11 MVA ini menyebabkan kenaikan tegangan di GI Sengguruh sebesar 5,43 kV, GI Turen sebesar 2,42 kV, GI Gampingan sebesar 5,30 kV, dan GI Karangkates sebesar 5,58 kV, serta menurunkan rugi daya total pada sistem sebesar 0,35 MW dan 0,61 MVAR.

4.4.2 Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Turen

Injeksi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor di Gardu Induk Turen dilakukan dengan cara mengubah Gardu Induk Turen yang awalnya merupakan PQ Bus menjadi PV Bus, yang mana akan dijaga besarnya daya nyata dan tegangannya. Dengan melakukan perhitungan aliran daya dapat diperoleh informasi besarnya tegangan, sudut tegangan, serta daya masing-masing gardu induk seperti yang disajikan pada tabel 4.5. Untuk perhitungan aliran daya sama pada perhitungan aliran daya pada subbab 4.4.1, hanya saja elemen matriks Jacobian-nya yang berbeda.

Dengan yang sama, maka didapatkan elemen-elemen matrik jacobian dengan menggunakan tabel (2.3). Karena Gardu Induk Turen (bus 3) merupakan PV Bus, matriks Jacobian menjadi seperti berikut:

$$Jacobian = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial P_2}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial P_3}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_4}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial P_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_5}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial P_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial P_5}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial Q_2}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_4}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial Q_4}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_5}{\partial E_2} & E_4 \frac{\partial Q_5}{\partial E_4} & E_5 \frac{\partial Q_5}{\partial E_5} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 & 32,3130 & -26,2736 & -4,2627 \\ 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 & 0,0000 & -1,7553 & 0,0000 \\ -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 & -26,2736 & 28,0290 & 0,0000 \\ -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 & -4,2627 & 0,0000 & 4,2627 \\ -32,3130 & 0,0000 & 26,2736 & 4,2627 & 84,1857 & -75,6168 & -5,1809 \\ 26,2736 & 1,7553 & -28,0290 & 0,0000 & -75,6168 & 78,9619 & 0,0000 \\ 4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & -4,2627 & -5,1809 & 0,0000 & 5,1890 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Dengan $[J]^{-1}$ adalah

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,1602 & 0,0843 & 0,1565 & 0,1602 & -0,0622 & -0,0599 & -0,0622 \\ 0,0843 & 0,1737 & 0,0883 & 0,0843 & -0,0003 & -0,0003 & -0,0003 \\ 0,1565 & 0,0883 & 0,1643 & 0,1565 & -0,0602 & -0,0620 & -0,0602 \\ 0,1602 & 0,0843 & 0,1565 & 0,2753 & -0,0622 & -0,0599 & -0,1569 \\ 0,0622 & 0,0003 & 0,0602 & 0,0622 & 0,1193 & 0,1136 & 0,1193 \\ 0,0599 & -0,0003 & 0,0620 & 0,0599 & 0,1136 & 0,1194 & 0,1136 \\ 0,0622 & 0,0003 & 0,0602 & 0,1569 & 0,1193 & 0,1136 & 0,2344 \end{bmatrix}$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta \delta_4^{(0)} \\ \Delta \delta_5^{(0)} \\ \frac{\Delta E_2}{E_2} \\ \frac{\Delta E_4}{E_4} \\ \frac{\Delta E_5}{E_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1602 & 0,0843 & 0,1565 & 0,1602 & -0,0622 & -0,0599 & -0,0622 \\ 0,0843 & 0,1737 & 0,0883 & 0,0843 & -0,0003 & -0,0003 & -0,0003 \\ 0,1565 & 0,0883 & 0,1643 & 0,1565 & -0,0602 & -0,0620 & -0,0602 \\ 0,1602 & 0,0843 & 0,1565 & 0,2753 & -0,0622 & -0,0599 & -0,1569 \\ 0,0622 & 0,0003 & 0,0602 & 0,0622 & 0,1193 & 0,1136 & 0,1193 \\ 0,0599 & -0,0003 & 0,0620 & 0,0599 & 0,1136 & 0,1194 & 0,1136 \\ 0,0622 & 0,0003 & 0,0602 & 0,1569 & 0,1193 & 0,1136 & 0,2344 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta P_5^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_4^{(0)} \\ \Delta Q_5^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0652 \\ -0,0833 \\ -0,0667 \\ -0,0727 \\ -0,0413 \\ -0,0405 \\ -0,0636 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, adalah melakukan perbaikan tegangan sesuai persamaan 2.54 dan 2.55.

Perbaikan tegangannya adalah :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0,0652) = -0,0652$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0,0833) = -0,0833$$

$$\delta_4^{(1)} = \delta_4^{(0)} + \Delta\delta_4^{(0)} = 0 + (-0,0667) = -0,0667$$

$$\delta_5^{(1)} = \delta_5^{(0)} + \Delta\delta_5^{(0)} = 0 + (-0,0727) = -0,0727$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(0)} + \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} x E_2^{(0)} = 1 + (-0,0413)x1 = 0,9587$$

$$E_3^{(1)} = E_3^{(0)} = 1$$

$$E_4^{(1)} = E_4^{(0)} + \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} x E_4^{(0)} = 1 + (-0,0405)x1 = 0,9595$$

$$E_5^{(1)} = E_5^{(0)} + \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} x E_5^{(0)} = 1 + (-0,0636)x1 = 0,9364$$

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \cos \delta_2 + E_2 \sin \delta_2 \\ E_3 \cos \delta_3 + E_3 \sin \delta_3 \\ E_4 \cos \delta_4 + E_4 \sin \delta_4 \\ E_5 \cos \delta_5 + E_5 \sin \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9567 - j0,0625 \\ 0,9965 - j0,0832 \\ 0,9574 - j0,0639 \\ 0,9340 - j0,0680 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9587 \angle -0,0652 \\ 1 \angle -0,0833 \\ 0,9595 \angle -0,0667 \\ 0,9364 \angle -0,0727 \end{bmatrix}$$

Karena belum mencapai konvergen, maka dilanjutkan iterasi ke langkah berikutnya hingga mencapai konvergen. Perhitungan mengalami konvergen pada iterasi ke-4 dimana hasil akhirnya sebagai berikut :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9527 - j0,0653 \\ 0,9962 - j0,0870 \\ 0,9535 - j0,0668 \\ 0,9282 - j0,0715 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9549 \angle -0,0684 \\ 1 \angle -0,0872 \\ 0,9558 \angle -0,0700 \\ 0,9309 \angle -0,0768 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 64,36 \angle -0,0684 \\ 67,4 \angle -0,0872 \\ 64,42 \angle -0,0700 \\ 62,75 \angle -0,0768 \end{bmatrix}$$

Sudut dalam matriks diatas adalah dalam bentuk radian, bisa juga dinyatakan dalam bentuk derajat sehingga :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 64,36 \angle -3,92 \\ 67,4 \angle -4,99 \\ 64,42 \angle -4,00 \\ 62,75 \angle -4,40 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapat hasil akhir tegangan tiap bus, maka dapat dihitung arus dan daya masing- masing bus :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6711 + j0,1277 \\ -0,0714 + j0,4628 \\ -0,3585 - j0,3504 \\ -0,1048 + j0,0755 \\ -0,1364 + j0,1005 \end{bmatrix}$$

$$S_{bus} = I_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6711 - j0,1277 \\ -0,0710 - j0,0399 \\ -0,3267 + j0,3803 \\ -0,1050 - j0,0650 \\ -0,1338 - j0,0835 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,11 - j12,77 \\ -7,10 - j3,99 \\ -32,67 + j38,03 \\ -10,50 - j6,50 \\ -13,38 - j8,35 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

Sehingga didapat total rugi daya sebesar $0,0346 + j0,0642$ pu atau sebesar 3,46 MW dan 6,42 MVAR.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Turen

Gardu Induk	Tegangan		Pembangkitan		Pembebanan	
	kV	sudut	MW	MVAR	MW	MVAR
Kebonagung	67,40	0,00	67,11	-12,77	-	-
Sengguruh	64,36	-3,92	14,50	8,99	21,60	12,98
Turen	67,40	-4,99	0,00	50,46	32,67	12,43
Gampingan	64,42	-4,00	0,00	0,00	10,50	6,50
Karangkates	62,75	-4,40	0,00	0,00	13,38	8,35
Total Rugi Daya			3,46 + j6,42 MVA			

Injeksi daya reaktif dengan pemasangan kapasitor yang dibutuhkan di GI Turen adalah sebesar 50,46 MVA. Pemasangan kapasitor sebesar 50,46 MVA ini menyebabkan kenaikan tegangan di GI Sengguruh sebesar 3,04 kV, GI Turen sebesar 4,78 kV, GI Gampingan sebesar 2,51 kV, dan GI Karangkates sebesar 2,47 kV, serta menurunkan rugi daya total pada sistem sebesar 0,14 MW dan 0,24 MVAR. Akan tetapi pemasangan kapasitor di GI Turen masih belum bisa memperbaiki sistem transmisi 70kV, dikarenakan pada salah satu gardu induk, yaitu GI Karangkates masih mengalami jatuh tegangan yang melebihi toleransi tegangan sebesar +5% s/d -10%.

4.4.3 Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Gampingan

Injeksi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor di Gardu Induk Gampingan dilakukan dengan cara mengubah Gardu Induk Gampingan yang awalnya merupakan PQ Bus menjadi PV Bus, yang mana akan dijaga besarnya daya nyata dan tegangannya. Dengan melakukan perhitungan aliran daya dapat diperoleh informasi besarnya tegangan, sudut tegangan, serta daya masing- masing gardu induk seperti yang disajikan pada tabel 4.6.

Untuk perhitungan aliran daya sama pada perhitungan aliran daya pada subbab 4.4.1, hanya saja elemen matriks Jacobian-nya yang berbeda.

Dengan yang sama, maka didapatkan elemen-elemen matrik jacobian dengan menggunakan tabel (2.3). Karena Gardu Induk Gampingan (bus 4) merupakan PV Bus, matriks Jacobian menjadi seperti berikut:

$$\text{Jacobian} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial P_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial P_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_4}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_4}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial P_4}{\partial E_5} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_5}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_5}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial P_5}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_2}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial Q_2}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial Q_3}{\partial E_5} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_5}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_5}{\partial E_3} & E_5 \frac{\partial Q_5}{\partial E_5} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 & 32,3130 & 0,0000 & -4,2627 \\ 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 & 0,0000 & 3,9115 & 0,0000 \\ -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 & -26,2736 & -1,7553 & 0,0000 \\ -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 & -4,2627 & 0,0000 & 4,2627 \\ -32,3130 & 0,0000 & 26,2736 & 4,2627 & 84,1857 & -75,6168 & -5,1809 \\ 0,0000 & -3,9115 & 1,7553 & 0,0000 & 0,0000 & 7,4550 & 0,0000 \\ 4,2627 & 0,0000 & 0,0000 & -4,2627 & -5,1809 & 0,0000 & 5,1890 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Dengan $[J]^{-1}$ adalah

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,1903 & 0,0842 & 0,1876 & 0,1903 & -0,0052 & 0,0000 & -0,0052 \\ 0,0842 & 0,1447 & 0,0881 & 0,0842 & -0,0006 & -0,0552 & -0,0006 \\ 0,1876 & 0,0881 & 0,1964 & 0,1876 & -0,0013 & 0,0000 & -0,0013 \\ 0,1903 & 0,0842 & 0,1876 & 0,3054 & -0,0052 & 0,0000 & -0,0999 \\ 0,0052 & 0,0006 & 0,0013 & 0,0052 & 0,0112 & 0,0000 & 0,0112 \\ 0,0000 & 0,0552 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1052 & 0,0000 \\ 0,0052 & 0,0006 & 0,0013 & 0,0999 & 0,0112 & 0,0000 & 0,1236 \end{bmatrix}$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta\delta_4^{(0)} \\ \Delta\delta_5^{(0)} \\ \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} \\ \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} \\ \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1903 & 0,0842 & 0,1876 & 0,1903 & -0,0052 & 0,0000 & -0,0052 \\ 0,0842 & 0,1447 & 0,0881 & 0,0842 & -0,0006 & -0,0552 & -0,0006 \\ 0,1876 & 0,0881 & 0,1964 & 0,1876 & -0,0013 & 0,0000 & -0,0013 \\ 0,1903 & 0,0842 & 0,1876 & 0,3054 & -0,0052 & 0,0000 & -0,0999 \\ 0,0052 & 0,0006 & 0,0013 & 0,0052 & 0,0112 & 0,0000 & 0,0112 \\ 0,0000 & 0,0552 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1052 & 0,0000 \\ 0,0052 & 0,0006 & 0,0013 & 0,0999 & 0,0112 & 0,0000 & 0,1236 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta P_5^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \\ \Delta Q_5^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0855 \\ -0,0668 \\ -0,0877 \\ -0,0930 \\ -0,0028 \\ -0,0311 \\ -0,0251 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, adalah melakukan perbaikan tegangan sesuai persamaan 2.54 dan 2.55.
Perbaikan tegangannya adalah :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0,0855) = -0,0855$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0,0668) = -0,0668$$

$$\delta_4^{(1)} = \delta_4^{(0)} + \Delta\delta_4^{(0)} = 0 + (-0,0877) = -0,0877$$

$$\delta_5^{(1)} = \delta_5^{(0)} + \Delta\delta_5^{(0)} = 0 + (-0,0930) = -0,0930$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(0)} + \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} x E_2^{(0)} = 1 + (-0,0028)x1 = 0,9972$$

$$E_3^{(1)} = E_3^{(0)} + \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} x E_3^{(0)} = 1 + (-0,0311)x1 = 0,9689$$

$$E_4^{(1)} = E_4^{(0)} = 1$$

$$E_5^{(1)} = E_5^{(0)} + \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} x E_5^{(0)} = 1 + (-0,0251)x1 = 0,9749$$

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \cos \delta_2 + E_2 \sin \delta_2 \\ E_3 \cos \delta_3 + E_3 \sin \delta_3 \\ E_4 \cos \delta_4 + E_4 \sin \delta_4 \\ E_5 \cos \delta_5 + E_5 \sin \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9936 - j0,0852 \\ 0,9667 - j0,0647 \\ 0,9962 - j0,0876 \\ 0,9707 - j0,0906 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9972 \angle -0,0855 \\ 0,9689 \angle -0,0688 \\ 1 \angle -0,0877 \\ 0,9749 \angle -0,0930 \end{bmatrix}$$

Karena belum mencapai konvergen, maka dilanjutkan iterasi ke langkah berikutnya hingga mencapai konvergen. Perhitungan mengalami konvergen pada iterasi ke-4 dimana hasil akhirnya sebagai berikut :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9930 - j0,0892 \\ 0,9640 - j0,0673 \\ 0,9958 - j0,0918 \\ 0,9695 - j0,0946 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9970 \angle -0,0896 \\ 0,9664 \angle -0,0697 \\ 1 \angle -0,0919 \\ 0,9741 \angle -0,0973 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 67,19 \angle -0,0896 \\ 65,13 \angle -0,0697 \\ 67,4 \angle -0,0919 \\ 65,65 \angle -0,0973 \end{bmatrix}$$

Sudut dalam matriks diatas adalah dalam bentuk radian, bisa juga dinyatakan dalam bentuk derajat sehingga :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 67,19 \angle -5,13 \\ 65,13 \angle -3,99 \\ 67,4 \angle -5,26 \\ 65,65 \angle -5,57 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapat hasil akhir tegangan tiap bus, maka dapat dihitung arus dan daya masing- masing bus :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6690 + j0,1319 \\ -0,0674 + j0,0462 \\ -0,3583 + j0,1519 \\ -0,1450 - j0,4287 \\ -0,1284 + j0,0987 \end{bmatrix}$$

$$S_{bus} = I_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6690 - j0,1319 \\ -0,0710 - j0,0399 \\ -0,3267 - j0,1243 \\ -0,1050 + j0,4402 \\ -0,1338 - j0,0835 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66,90 - j13,19 \\ -7,10 - j3,99 \\ -32,67 - j12,43 \\ -10,50 + j44,02 \\ -13,38 - j8,35 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

Sehingga didapat total rugi daya sebesar $0,0325 + j0,0606$ pu atau sebesar 3,25 MW dan 6,06 MVAR.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Gampingan

Gardu Induk	Tegangan		Pembangkitan		Pembebanan	
	kV	sudut	MW	MVAR	MW	MVAR
Kebonagung	67,40	0,00	66,90	-13,19	-	-
Sengguruh	67,19	-5,13	14,50	8,99	21,60	12,98
Turen	65,13	-3,99	0,00	0,00	32,67	12,43
Gampingan	67,40	-5,26	0,00	50,52	10,50	6,50
Karangates	65,65	-5,57	0,00	0,00	13,38	8,35
Total Rugi Daya			3,25 + j6,06 MVA			

Injeksi daya reaktif dengan pemasangan kapasitor yang dibutuhkan di GI Gampingan adalah sebesar 50,52 MVA. Pemasangan kapasitor sebesar 50,52 MVA ini menyebabkan kenaikan tegangan di GI Sengguruh sebesar 5,22 kV, GI Turen sebesar 2,51 kV, GI

Gampingan sebesar 5,49 kV, dan GI Karangates sebesar 5,37 kV, serta menurunkan rugi daya total pada sistem sebesar 0,35 MW dan 0,60 MVAR.

4.4.4 Pemasangan Kapasitor di Gardu Induk Karangates

Injeksi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor di Gardu Induk Karangates dilakukan dengan cara mengubah Gardu Induk Karangates yang awalnya merupakan PQ Bus menjadi PV Bus, yang mana akan dijaga besarnya daya nyata dan tegangannya. Dengan melakukan perhitungan aliran daya dapat diperoleh informasi besarnya tegangan, sudut tegangan, serta daya masing-masing gardu induk seperti yang disajikan pada tabel 4.7. Untuk perhitungan aliran daya sama pada perhitungan aliran daya pada subbab 4.4.1, hanya saja elemen matriks Jacobian-nya yang berbeda.

Dengan yang sama, maka didapatkan elemen-elemen matrik jacobian dengan menggunakan tabel (2.3). Karena Gardu Induk Karangates (bus 5) merupakan PV Bus, matriks Jacobian menjadi seperti berikut:

$$\text{Jacobian} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_2}{\partial E_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_3}{\partial E_4} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_4}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_4}{\partial E_4} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial P_5}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial P_5}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial P_5}{\partial E_4} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_2}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_2}{\partial E_4} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_3}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_3}{\partial E_4} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_5} & E_2 \frac{\partial Q_4}{\partial E_2} & E_3 \frac{\partial Q_4}{\partial E_3} & E_4 \frac{\partial Q_4}{\partial E_4} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 84,1857 & 0,0000 & -75,6168 & -5,1809 & 32,3130 & 0,0000 & -26,2736 \\ 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 & 0,0000 & 0,0000 & 3,9115 & -1,7553 \\ -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 & 0,0000 & -26,2736 & -1,7553 & 28,0290 \\ -5,1809 & 0,0000 & 0,0000 & 5,1890 & -4,2627 & 0,0000 & 0,0000 \\ -32,3130 & 0,0000 & 26,2736 & 4,2627 & 84,1857 & -75,6168 & -75,6168 \\ 0,0000 & -3,9115 & 1,7553 & 0,0000 & 0,0000 & 7,4550 & -3,3451 \\ 26,2736 & 1,7553 & -28,0290 & 0,0000 & -75,6168 & -3,3451 & 78,9619 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & J \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \\ E \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Dengan $[J]^{-1}$ adalah

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,1748 & 0,0764 & 0,1703 & 0,2030 & -0,0342 & -0,0152 & -0,0340 \\ 0,0764 & 0,1409 & 0,0796 & 0,0888 & -0,0151 & -0,0627 & -0,0168 \\ 0,1703 & 0,0796 & 0,1774 & 0,1979 & -0,0336 & -0,0168 & -0,0374 \\ 0,2030 & 0,0888 & 0,1979 & 0,3798 & 0,0196 & 0,0082 & 0,0184 \\ 0,0342 & 0,0151 & 0,0336 & -0,0196 & 0,0654 & 0,0285 & 0,0636 \\ 0,0152 & 0,0627 & 0,0168 & -0,0082 & 0,0285 & 0,1200 & 0,0329 \\ 0,0340 & 0,0168 & 0,0374 & -0,0184 & 0,0636 & 0,0329 & 0,0734 \end{bmatrix}$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta\delta_4^{(0)} \\ \Delta\delta_5^{(0)} \\ \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} \\ \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} \\ \frac{\Delta E_5^{(0)}}{E_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1748 & 0,0764 & 0,1703 & 0,2030 & -0,0342 & -0,0152 & -0,0340 \\ 0,0764 & 0,1409 & 0,0796 & 0,0888 & -0,0151 & -0,0627 & -0,0168 \\ 0,1703 & 0,0796 & 0,1774 & 0,1979 & -0,0336 & -0,0168 & -0,0374 \\ 0,2030 & 0,0888 & 0,1979 & 0,3798 & 0,0196 & 0,0082 & 0,0184 \\ 0,0342 & 0,0151 & 0,0336 & -0,0196 & 0,0654 & 0,0285 & 0,0636 \\ 0,0152 & 0,0627 & 0,0168 & -0,0082 & 0,0285 & 0,1200 & 0,0329 \\ 0,0340 & 0,0168 & 0,0374 & -0,0184 & 0,0636 & 0,0329 & 0,0734 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta P_5^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \\ \Delta Q_5^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0770 \\ -0,0662 \\ -0,0774 \\ -0,1180 \\ -0,0185 \\ -0,0404 \\ -0,0208 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, adalah melakukan perbaikan tegangan sesuai persamaan 2.54 dan 2.55.

Perbaikan tegangannya adalah :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 0 + (-0,0770) = -0,0770$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = 0 + (-0,0662) = -0,0662$$

$$\delta_4^{(1)} = \delta_4^{(0)} + \Delta\delta_4^{(0)} = 0 + (-0,0774) = -0,0774$$

$$\delta_5^{(1)} = \delta_5^{(0)} + \Delta\delta_5^{(0)} = 0 + (-0,1180) = -0,1180$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(0)} + \frac{\Delta E_2^{(0)}}{E_2} x E_2^{(0)} = 1 + (-0,0185)x1 = 0,9815$$

$$E_3^{(1)} = E_3^{(0)} + \frac{\Delta E_3^{(0)}}{E_3} x E_3^{(0)} = 1 + (-0,0404)x1 = 0,9596$$

$$E_4^{(1)} = E_4^{(0)} + \frac{\Delta E_4^{(0)}}{E_4} x E_4^{(0)} = 1 + (-0,0208)x1 = 0,9792$$

$$E_5^{(1)} = E_5^{(0)} = 1$$

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \cos \delta_2 + E_1 \sin \delta_2 \\ E_3 \cos \delta_3 + E_1 \sin \delta_3 \\ E_4 \cos \delta_4 + E_1 \sin \delta_4 \\ E_5 \cos \delta_5 + E_1 \sin \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9786 - j0,0755 \\ 0,9577 - j0,0597 \\ 0,9763 - j0,0757 \\ 0,9930 - j0,1178 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9815 \angle -0,0770 \\ 0,9596 \angle -0,0622 \\ 0,9792 \angle -0,0774 \\ 1 \angle -0,1180 \end{bmatrix}$$

Karena belum mencapai konvergen, maka dilanjutkan iterasi ke langkah berikutnya hingga mencapai konvergen. Perhitungan mengalami konvergen pada iterasi ke-4 dimana hasil akhirnya sebagai berikut :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9758 - j0,0806 \\ 0,9537 - j0,0628 \\ 0,9735 - j0,0808 \\ 0,9919 - j0,1268 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 0,9791 \angle -0,0824 \\ 0,9558 \angle -0,0658 \\ 0,9768 \angle -0,0828 \\ 1 \angle -0,1271 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 65,99 \angle -0,0824 \\ 64,42 \angle -0,0658 \\ 65,84 \angle -0,0828 \\ 67,4 \angle -0,1271 \end{bmatrix}$$

Sudut dalam matriks diatas adalah dalam bentuk radian, bisa juga dinyatakan dalam bentuk derajat sehingga :

$$E_{bus} = \begin{bmatrix} 67,4 \angle 0 \\ 65,99 \angle -4,72 \\ 64,42 \angle -3,77 \\ 65,84 \angle -4,74 \\ 67,4 \angle -7,28 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapat hasil akhir tegangan tiap bus, maka dapat dihitung arus dan daya masing- masing bus :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6738 + j0,0065 \\ -0,0689 + j0,0466 \\ -0,3325 + j0,1523 \\ -0,1016 + j0,0752 \\ -0,1707 - j0,2805 \end{bmatrix}$$

$$S_{bus} = I_{bus} \cdot E_{bus} = \begin{bmatrix} 0,6738 - j0,0065 \\ -0,0710 - j0,0399 \\ -0,3267 - j0,1243 \\ -0,1050 - j0,0650 \\ -0,1338 + j0,2999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,38 - j0,65 \\ -7,10 - j3,99 \\ -32,67 - j12,43 \\ -10,50 - j6,50 \\ -13,38 + j29,99 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

Sehingga didapat total rugi daya sebesar $0,0373 + j0,0642$ pu atau sebesar 3,73 MW dan 6,42 MVAR.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan dengan penambahan kapasitor di GI Karangates

Gardu Induk	Tegangan		Pembangkitan		Pembebanan	
	kV	sudut	MW	MVAR	MW	MVAR
Kebonagung	67,40	0,00	67,38	-0,65	-	-
Sengguruh	65,99	-4,72	14,50	8,99	21,60	12,98
Turen	64,42	-3,77	0,00	0,00	32,67	12,43
Gampangan	65,84	-4,74	0,00	0,00	10,50	6,50
Karangates	67,40	-7,28	0,00	38,34	13,38	8,35
Total Rugi Daya			3,73 + j6,42 MVA			

Injeksi daya reaktif dengan pemasangan kapasitor yang dibutuhkan di GI Karangates adalah sebesar 38,34 MVA. Pemasangan kapasitor sebesar 38,34 MVA ini menyebabkan kenaikan tegangan di GI Sengguruh sebesar 4,02 kV, GI Turen sebesar 1,80 kV, GI Gampingan sebesar 3,93 kV, dan GI Karangates sebesar 7,12 kV, serta menaikkan rugi daya pada sistem sebesar 0,13 MW dan menurunkan rugi daya sistem sebesar 0,24 MVAR.

4.4.5 Penempatan Kapasitor yang Optimal

Penempatan kapasitor yang optimal dapat dilihat dari besarnya kenaikan tegangan pada sistem dan berkurangnya total rugi daya sistem. Penempatan kapasitor disebut optimal jika sistem mengalami kenaikan tegangan terbesar dan total rugi daya sistem terkecil. Tabel 4.8 adalah rekapitulasi hasil kenaikan tegangan dan penurunan rugi daya sistem dari pembahasan pada subbab 4.4.1 sampai dengan 4.4.4.

Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Tegangan dan Penurunan Rugi Daya

Lokasi Kapasitor	Tegangan Bus			Total Rugi Daya	
	Bus	Tegangan (kV)	Sudut	MW	MVAR
Tanpa Kapasitor	Kebonagung	67,40	0,00	3,60	6,66
	Sengguruh	61,97	-3,05		
	Turen	62,62	-3,09		
	Gampingan	61,91	-3,11		
	Karangates	60,28	-3,57		
Sengguruh	Kebonagung	67,40	0,00	3,25	6,05
	Sengguruh	67,40	-5,20		
	Turen	65,04	-3,97		
	Gampingan	67,21	-5,21		
	Karangates	65,86	-5,63		
Turen	Kebonagung	67,40	0,00	3,46	6,42
	Sengguruh	64,36	-3,92		
	Turen	67,40	-4,99		
	Gampingan	64,42	-4,00		
	Karangates	62,75	-4,40		
Gampingan	Kebonagung	67,40	0,00	3,25	6,06
	Sengguruh	67,19	-5,13		
	Turen	65,13	-3,99		
	Gampingan	67,40	-5,26		
	Karangates	65,65	-5,57		
Karangates	Kebonagung	67,40	0,00	3,73	6,42
	Sengguruh	65,99	-4,72		
	Turen	64,42	-3,77		
	Gampingan	65,84	-4,74		
	Karangates	67,40	-7,28		

Dari tabel 4.8 diatas dapat dilihat bahwa injeksi daya reaktif dengan pemasangan kapasitor yang paling optimal adalah di Gardu Induk Sengguruh karena dapat menaikkan tegangan terbesar dan mempunyai total rugi daya sistem terkecil.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Kondisi tegangan pada kondisi saat ini belum memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%. Tegangan di GI Kebonagung sebesar 67,4 kV, GI Sengguruh sebesar 61,97 kV, GI Turen sebesar 62,62 kV, GI Gampingan sebesar 61,91 kV, GI Karangates sebesar 60,28 kV, dan rugi daya total sebesar 3,60 MW dan 6,66 MVAR.
2. a. Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Sengguruh sebesar 51,11 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 67,4 kV (naik 5,43 kV), GI Turen sebesar 65,04 kV (naik 2,42 kV), GI Gampingan sebesar 67,21 kV (naik 5,30 kV), GI Karangates sebesar 65,86 kV (naik 5,58 kV), dan rugi daya total sebesar 3,25 MW dan 6,05 MVAR (turun 0,35 MW dan 0,61 MVAR)
- b. Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Turen sebesar 50,46 MVA belum berhasil memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%, dikarenakan tegangan di GI Karangates masih melebihi toleransi tegangan. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 64,36 kV (naik 3,04 kV), GI Turen sebesar 67,4 kV (naik 4,78 kV), GI Gampingan sebesar 64,42 kV (naik 2,51 kV), GI Karangates sebesar 62,75 kV (naik 2,47 kV), dan rugi daya total sebesar 3,46 MW dan 6,42 MVAR (turun 0,14 MW dan 0,24 MVAR)
- c. Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Gampingan sebesar 50,52 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 67,19 kV (naik 5,22 kV), GI Turen sebesar 65,13 kV (naik 2,51 kV), GI Gampingan sebesar 67,4 kV (naik 5,49 kV), GI Karangates sebesar 65,65 kV (naik 5,37 kV), dan rugi daya total sebesar 3,25 MW dan 6,06 MVAR (turun 0,35 MW dan 0,60 MVAR)

- d. Upaya perbaikan dengan pemasangan kapasitor di GI Karangates sebesar 38,34 MVA telah berhasil memenuhi toleransi tegangan yang telah ditetapkan PT. PLN (Persero) sebesar +5% s/d -10%. Tegangan di GI Sengguruh sebesar 65,99 kV (naik 4,02 kV), GI Turen sebesar 64,42 kV (naik 1,80 kV), GI Gampingan sebesar 65,84 kV (naik 3,93 kV), GI Karangates sebesar 67,4 kV (naik 7,12 kV), dan rugi daya total sebesar 3,73 MW dan 6,42 MVAR (naik 0,13 MW dan turun 0,24 MVAR)
3. Perbaikan dengan pemasangan kapasitor yang paling optimal adalah di Gardu Induk Sengguruh karena dapat menaikkan tegangan terbesar dan mempunyai total rugi daya sistem terkecil.

5.2 Saran

1. Agar hasil yang didapat lebih presisi, perlu diperhitungkan aspek lain seperti impedansi transformator, rugi daya transformator dan lain sebagainya.
2. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut tentang penambahan trafo untuk memperbaiki nilai tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.
3. Agar dapat melengkapi hasil penelitian ini maka disarankan agar peneliti lain membandingkan hasil ini menggunakan metode lain.

DAFTAR PUSTAKA

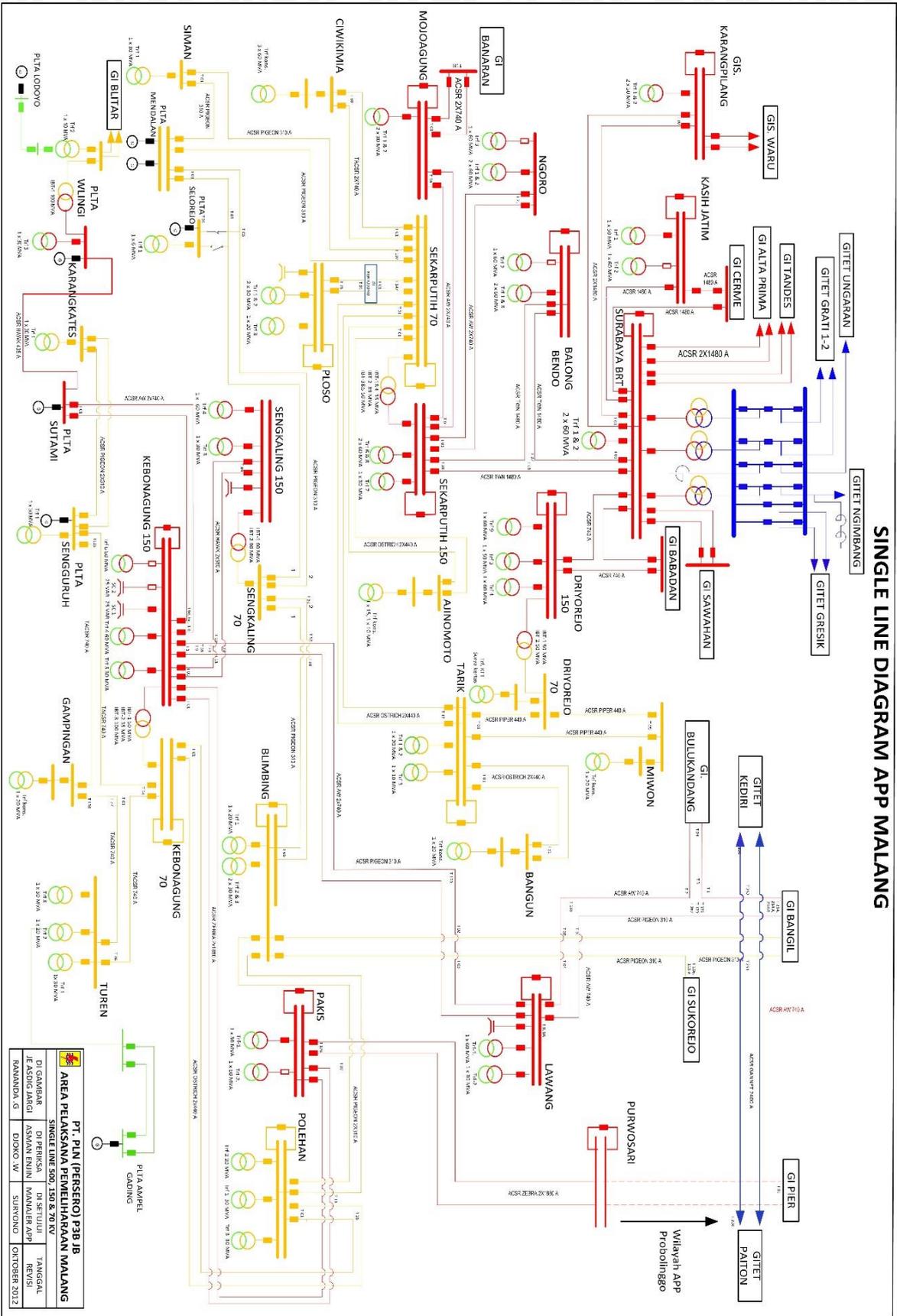
- Dhar, R.N., 1982. *Computer Aided Power System Operation and Analysis*. New York : McGraw-Hill Company
- Ehendra. 2014. *STL01*[Online]: <https://ehendra.wordpress.com/stl-01>[Diakses: 10 Mei 2015]
- Gonen, Turan. 1988. *Modern Power System Analysis*. Boca Raton : CRC Press
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Grigsby, L. L. 2001. *Power System Analysis and Simulation*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Handajadi, W. 2014. Analisis Perbaikan Tegangan Pada Subsistem Dengan Pemasangan Kapasitor Bank Dengan ETAP Versi 7.0. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*. Yogyakarta.
- Pabla, A.S. 1991. *Electric Power Distribution*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Reinaldo. 2009. Analisis Kualitas Daya dan Cara Peningkatannya pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah dan Rendah EDTL TIMOR LESTE di Sistem PLTD Kabupaten Baucau. *Jurnal Skripsi ITS*. Surabaya.
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. United States of America: Mcgraw-Hill.
- Shidiq, M. 2009. *Operasi Sistem Daya Elektrik*. Malang: Bagian Penerbitan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Shidiq, M. 2015. *Saltrans(ganjil13)*. Malang: Tidak Diterbitkan.
- SPLN-1:1995. 1995. *Tegangan- Tegangan Standar*. Jakarta: PT PLN (PERSERO).
- Stagg, El Abiad. 1981. *Computer Methods in Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Tobing, B. L. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Stevenson, William D. 1993. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



SINGLE LINE DIAGRAM APP MALANG



Data Penghantar

No	Gardu Induk	Tegangan	Bay	L/km	Penghantar				
					Jenis	Q (mm ²)	I Nominal (Amper)	Impedansi	
								R	X
1	KB.AGUNG	150 KV	LAWANG 1	25.800	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
2	KB.AGUNG	150 KV	LAWANG 2	25.800	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
3	KB.AGUNG	150 KV	SKALING 1	15.100	ACSR HAWK	241.5	580	0.1370	0.3966
4	KB.AGUNG	150 KV	SKALING 2	15.100	ACSR HAWK	241.5	580	0.1370	0.3966
5	KB.AGUNG	150 KV	PAKIS 1	12.900	ACSR ZEBRA (222a)	2 X 435	1880	0.0333	0.2330
6	KB.AGUNG	150 KV	PAKIS 2	12.900	ACSR ZEBRA (222a)	2 X 435	1880	0.0333	0.2330
7	KB.AGUNG	150 KV	SUTAMI 1	27.950	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
8	KB.AGUNG	150 KV	SUTAMI 2	27.950	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
9	KB.AGUNG	70 KV	POLEHAN 1	11.425	ACSR OSTRICH 300 MCM	156	440	0.1896	0.3750
10	KB.AGUNG	70 KV	POLEHAN 2	11.425	ACSR OSTRICH 300 MCM	156	440	0.1896	0.3750
11	KB.AGUNG	70 KV	SENGGURUH	25.775	TACSR	160	740	0.2140	0.4080
12	KB.AGUNG	70 KV	TUREN	21.240	TACSR	160	740	0.2140	0.4080
13	SUTAMI	150 KV	KB.AGUNG 1	27.950	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
14	SUTAMI	150 KV	KB.AGUNG 2	27.950	ACSR AW	330	740	0.0888	0.3860
15	SUTAMI	150 KV	WLINGI	23.600	ACSR 160	160	435	0.1820	0.4566
16	SENGGURL	70 KV	KB.AGUNG	25.775	TACSR 160	160	740	0.1400	0.4000
17	SENGGURL	70 KV	GAMPINGAN	1.345	TACSR 160	160	740	0.1400	0.4000
18	SENGGURL	70 KV	K.KATES 1	12.770	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
19	SENGGURL	70 KV	K.KATES 2	12.770	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
20	GAMPINGA	70 KV	TUREN	26.100	TACSR 160	160	740	0.2140	0.4080
21	GAMPINGA	70 KV	SENGGURUH	1.345	TACSR 160	160	740	0.2140	0.4080
22	K.KATES	70 KV	S.GURUH 1	12.770	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3866	0.3584
23	K.KATES	70 KV	S.GURUH 2	12.770	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3866	0.3584
24	TUREN	70 KV	KB.AGUNG	21.240	TACSR	160	745	0.2140	0.4080
25	TUREN	70 KV	GAMPINGAN	26.100	TACSR 160	160	745	0.2140	0.4080
26	BLIMBING	70 KV	S.KALING 1	8.610	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3866	0.3584
27	BLIMBING	70 KV	S.KALING 2	8.610	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3866	0.3584
28	BLIMBING	70 KV	BANGIL 1	45.600	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
29	BLIMBING	70 KV	SUKOREJO	27,3	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
30	BLIMBING	70 KV	POLEHAN 1	12.182	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
31	BLIMBING	70 KV	POLEHAN 2	12.182	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
32	POLEHAN	70 KV	BLIMBING 1	12.182	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
33	POLEHAN	70 KV	BLIMBING 2	12.182	ACSR PIGEON 3/0	3/0	312	0.3370	0.4094
34	POLEHAN	70 KV	KB.AGUNG 1	11.425	ACSR OSTRICH 300 MCM	156	440	0.2175	0.3871
35	POLEHAN	70 KV	KB.AGUNG 2	11.425	ACSR OSTRICH 300 MCM	156	440	0.2175	0.3871