



TESIS - EE185401

PENENTUAN HARGA TRANSAKSI ENERGI LISTRIK ANTAR PELANGGAN DENGAN METODE POWER FLOW TRACING BERBASIS PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN

AVIAN LUKMAN SETYA BUDI
6022201038

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Feby Agung Pamuji ST.,MT.,Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2021



TESIS - EE185401

**PENENTUAN HARGA TRANSAKSI ENERGI LISTRIK
ANTAR PELANGGAN DENGAN METODE POWER
FLOW TRACING BERBASIS PEMBANGKIT LISTRIK
ENERGI TERBARUKAN**

AVIAN LUKMAN SETYA BUDI
6022201038

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Feby Agung Pamuji ST.,MT.,Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2021

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AVIAN LUKMAN SETYA BUDI

NRP: 6022201038

Tanggal Ujian: 4 Februari 2021

Periode Wisuda: Maret 2021

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP: 196404051990021001



2. Feby Agung Pamuji ST., MT., Ph.D.
NIP: 198702062012121002

Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT
NIP: 195512071980031004



2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP: 197411292000121001

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

Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., Ph.D.

NIP: 197311192000031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“PENENTUAN HARGA TRANSAKSI ENERGI LISTRIK ANTAR PELANGGAN DENGAN METODE POWER FLOW TRACING BERBASIS PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, 15 Februari 2021



Avian Lukman Setya Budi

NRP. 6022201038

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENENTUAN HARGA TRANSAKSI ENERGI LISTRIK ANTAR PELANGGAN DENGAN METODE POWER FLOW TRACING BERBASIS PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN

Nama mahasiswa : Avian Lukman Setya Budi
NRP : 0711164000055
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T
2. Feby Agung Pamuji ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Distribusi dan Transmisi tenaga listrik menjadi salah satu faktor penting dalam proses aliran daya dari pembangkit menuju pelanggan. Sumber energi yang digunakan untuk penyaluran aliran daya ini juga semakin bervariasi, salah satunya adalah *Renewable Energy* pada *Smart Grid*.

Smart grid adalah jaringan listrik pintar yang mampu mengintegrasikan aksi-aksi atau kegiatan dari semua pelanggan, mulai dari pembangkit sampai ke konsumen dengan tujuan agar efisien, berkelanjutan, ekonomis dan penyediaan listrik yang aman. Namun hingga kini masih belum ada regulasi terkait transaksi energi antar pelanggan dan penentuan harga listrik pada setiap penggunaan.

Penentuan harga transaksi energi listrik antar pelanggan ini akan ditentukan dengan mencari terlebih dahulu daya yang terpakai dari masing-masing jenis pembangkit yang ada menggunakan metode *Power Flow Tracing*. Dengan melihat karakteristik konsumsi energi pelanggan maka dapat ditentukan berapa nilai investasi awal dan nilai jual yang harus dibayar kepada salah satu atau lebih pembangkit dengan memberi asumsi bahwa kualitas listrik yang diberikan setiap pembangkit sama.

Dari hasil simulasi dan perhitungan didapatkan bahwa secara ekonomis, kombinasi yang paling bagus adalah 2 PLTA dengan 1 turbin angin dengan harga per kWh nya adalah Rp867 dan 2 PLTA dengan 1 panel surya dengan harga per kWh nya adalah Rp1034. Untuk efisiensi tertinggi didapatkan dari kombinasi 2 PLTA dengan 1 turbin angin dengan tingkat efisiensi sebesar 40,95%. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat membantu mempermudah penentuan harga mempertimbangkan jenis pembangkit dalam suatu sistem *off-grid*.

Kata kunci: Penentuan harga, *Power Flow Tracing*, *Smart Grid*, Transaksi energi listrik, *Renewable Energy*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DETERMINING THE PRICE OF ELECTRICITY ENERGY TRANSACTIONS WITH A POWER FLOW TRACING METHOD BASED ON RENEWABLE ENERGY ELECTRIC POWER PLANT

By : Avian Lukman Setya Budi
Student Identity Number : 0711164000055
Supervisor(s) : 1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T
2. Feby Agung Pamuji ST.,MT.,Ph.D

ABSTRACT

Distribution and transmission system of electricity is one of the important factors in the process of power flow from the generator to the customer. The energy sources used to distribute electricity are increasingly varied, one of which is Renewable Energy on the Smart Grid.

Smart grid is a smart electricity network that is able to integrate the actions or activities of all customers, from generating to consumers with the aim of being efficient, sustainable, economical and providing safe electricity. But until now there is still no regulation related to energy transactions between customers and determining the price of electricity for each use.

Determination of the price of electrical energy transactions between customers will be determined by first finding the power used from each type of existing power plant using the Power Flow Tracing method. By looking at the characteristics of the customer's energy consumption, it can be determined how much the initial investment and selling value must be paid to one or more generators by assuming that the quality of electricity supplied by each generator is the same.

From the simulation and calculation results, it is found that economically, the best combination is 2 hydropower with 1 wind turbine with a price per kWh of IDR 867 and 2 hydropower with 1 solar panel at a price per kWh of IDR 1034. The highest efficiency is obtained from a combination of 2 hydropower plants with 1 wind turbine with an efficiency level of 40.95%. It is hoped that this research can help simplify pricing considering the type of power plant in an off-grid system.

Key words : Pricing, Power Flow Tracing, Smart Grid, Electric energy transactions, Renewable Energy

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan atas rahmat dan karunia yang telah diberikan oleh Allah Subhanahu wa Ta'ala sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis yang berjudul “Penentuan Harga Transaksi Energi Listrik Antar Pelanggan Dengan Metode Power Flow Tracing Berbasis Pembangkit Listrik Energi Terbarukan”. Penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan selama pengerjaan tesis ini kepada:

1. Bapak Iwan Setya Budi dan Ibu Evida Mei Milawati selaku orang tua yang senantiasa memberikan semangat dan doa, tidak lupa juga kepada Abah H. M. Soetikno dan Umik Hj. Siti Rachmah Moeljani dan keluarga.
2. Bapak Profesor Adi Soeprijanto selaku dosen pembimbing satu yang memberikan pengarahannya, saran dan motivasi. Bapak Feby Agung Pamuji selaku dosen pembimbing kedua yang selalu memberikan ilmu dan bimbingan.
3. Bapak Profesor Soedibyo selaku salah satu dosen yang memiliki pengaruh besar dalam berjalannya studi magister hingga selesai.
4. Ibu Ni Ketut Aryani selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi dan dukungan penuh dalam konsultasi selama perkuliahan dari sarjana hingga ke magister.
5. Seluruh rekan Pasca Sistem Tenaga Elektro, mulai dari angkatan ganjil 2019, genap 2018, ganjil 2018, dan genap 2017 yang senantiasa membantu dan mengisi hari perkuliahan saya.
6. Ratri Bodromulatsih, Hanif Solvianto, dan Fitra Alghifari Suhardi sebagai katalisator utama.

Dalam penulisan tesis ini dimungkinkan tidak luput dari kesalahan. Kritik dan saran sangat diharapkan untuk memperbaiki semua kesalahan. Harapan terakhir semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi seluruh mahasiswa dan dapat dijadikan sebagai acuan di dunia industri.

Surabaya, 15 Februari 2021

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Kontribusi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Teori Dasar.....	7
2.2.1 <i>Power Flow Tracing</i> [1][2][14]	7
2.2.2 <i>Water Turbine</i> [15][16].....	8
2.2.3 <i>Wind Turbine</i> [3][11]	10
2.2.4 <i>Photovoltaic</i> [18][19].....	12
2.2.5 Karakteristik beban [8][20].....	14
2.2.6 <i>Renewable Energy Generation Cost Model</i> [10].....	15
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Sistem IEEE 9 Bus.....	20
3.2 Logika <i>Incidence Matrix</i>	21
3.3 Pencarian rugi-rugi daya aktif dan reaktif	22

3.4	<i>Forecasting</i> beban dengan karakteristik beban	23
3.5	Pembentukan Fungsi Objektif.....	24
3.6	Pembentukan Constraint.....	24
3.7	Pertimbangan Penyimpan Energi Listrik	25
3.8	Studi Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	29
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN		36
4.1	Pelacakan Rugi-rugi Daya Aktif dengan Power Flow Tracing terhadap Dummy IEEE 9-Bus (<i>Dummy IEEE 9-Bus P-Loss Tracing Testing</i>).....	36
4.2	Pelacakan Rugi-rugi Daya Reaktif dengan Power Flow Tracing terhadap Dummy IEEE 9-Bus (<i>Dummy IEEE 9-Bus Q-Loss Tracing Testing</i>)	38
4.3	Studi Kasus Sistem Energi Terbarukan <i>On-Grid</i> dan <i>Off-Grid</i>	40
4.4	Simulasi Sistem Pembangkit Energi Terbarukan Photovoltaic Dengan Menggunakan Penyimpan Energi Dalam Skenario <i>Renewable Energy Off-Grid</i>	46
4.5	Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (<i>Photovoltaic Installation Cost and Sizing</i>).....	52
4.6	Studi Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (<i>Hydropower Real Efficiency Calculation</i>) dan Performa Stabilitas Frekuensi Skenario <i>Swing Generator</i>	67
4.7	Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Air (<i>Hydropower Installation Cost and Sizing</i>).....	79
4.8	Simulasi Sistem Pembangkit Energi Terbarukan Wind Turbine Dengan Menggunakan Penyimpan Energi Dalam Skenario <i>Renewable Energy Off-Grid</i>	83
4.9	Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Angin (<i>Wind Turbine Installation Cost and Sizing</i>).....	89
4.10	Penentuan Efisiensi Per Pembangkit dan Komparasi Kombinasi Pembangkit Terpasang Kasus Off-Grid (<i>Efficiency-per-Combination Calculation</i>).....	92
BAB 5 KESIMPULAN		94
DAFTAR PUSTAKA.....		96
LAMPIRAN		99
DAFTAR INDEX.....		108

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh aliran daya yang bisa terlacak pada sistem 4 bus [1].....	8
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	18
Gambar 3.2 Sistem IEEE 9-Bus.....	20
Gambar 3.3 Prinsip pembagian proporsional.....	21
Gambar 3.4 Penambahan <i>pseudo-bus</i> sebagai beban reaktif	23
Gambar 3.5 Asumsi beban pada IEEE 9 bus sebagai <i>average load</i>	23
Gambar 3.6 Pemodelan PV untuk Simulasi Penyimpan Energi	26
Gambar 3.7 Pemodelan Baterai dan Superkapasitor untuk Simulasi Penyimpan Energi	26
Gambar 3.8 Sistem Bidirectional Converter untuk Simulasi Penyimpan Energi .	27
Gambar 3.9 Sistem MPPT berbasis Perturb and Observe untuk Simulasi Penyimpan Energi	27
Gambar 3.10 Flowchart Algoritma Perturb and Observe untuk MPPT.....	28
Gambar 3.11 Blok Diagram PLTA 130 MW MATLAB Simulink	30
Gambar 3.12 Dasar Blok Diagram model PLTA yang dibuat di MATLAB Simulink	31
Gambar 3.13 Flowchart Sistem Kontrol PSO untuk tuning kontrol PI pada LFC	33
Gambar 4.1 Single Line Diagram <i>Dummy IEEE 9-Bus System</i>	37
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan Keluaran PV	46
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Arus, Tegangan dan SOC Baterai Skenario Baterai-PV	47
Gambar 4.4 Hasil Simulasi Daya Baterai Skenario Baterai-PV	47
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Baterai Skenario <i>Hybrid Storage-PV</i>	48
Gambar 4.6 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Superkapasitor Skenario <i>Hybrid Storage-PV</i>	49
Gambar 4.7 Hasil Simulasi Perbandingan Daya Baterai dan Superkapasitor Skenario <i>Hybrid Storage-PV</i>	50
Gambar 4.8 Proyeksi Beban Rumah 450 VA	52
Gambar 4.9 Grafik Ampere Discharge 19.00 hingga 05.00 dari Rumah 450 VA	53
Gambar 4.10 Grafik Efisiensi Inverter yang Digunakan	53
Gambar 4.11 Desain Buck Converter yang Digunakan	55
Gambar 4.12 Simulasi Desain Buck Converter pada PSIM yang Digunakan	56
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Tegangan pada PSIM yang Digunakan	57
Gambar 4.14 Solar Elevation di Indonesia	59
Gambar 4.15 Rencana Kemiringan PV Sesuai Solar Elevation di Indonesia	60
Gambar 4.16 Perbandingan Daya PV, Beban, dan Baterai.....	61
Gambar 4.17 Perbandingan Daya PV, Beban, dan Baterai.....	61
Gambar 4.18 Scheduling Kebutuhan Backup System	62
Gambar 4.19 Hasil Frekuensi Simulasi Plant Uncontrolled	67
Gambar 4.20 Hasil Frekuensi Simulasi Plant Uncontrolled	67

Gambar 4.21 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant Uncontrolled	68
Gambar 4.22 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu Uncontrolled	68
Gambar 4.23 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant Uncontrolled Dalam Satuan pu	69
Gambar 4.24 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu Uncontrolled	69
Gambar 4.25 <i>Tuning Ziegler Nichols Type 1</i>	70
Gambar 4.26 Parameter PI sebelum dan sesudah tuning Ziegler Nichols Type 1	70
Gambar 4.27 Hasil Frekuensi Simulasi Plant <i>Ziegler Nichols</i>	71
Gambar 4.28 Hasil Rekam Hasil Frekuensi Fungsi Waktu Ziegler Nichols	71
Gambar 4.29 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant <i>Ziegler Nichols</i>	72
Gambar 4.30 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu <i>Ziegler Nichols</i>	72
Gambar 4.31 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant <i>Ziegler Nichols</i> Dalam Satuan pu	73
Gambar 4.32 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu <i>Ziegler Nichols</i>	73
Gambar 4.33 Hasil <i>Tuning PSO</i>	74
Gambar 4.34 Hasil <i>Parameter PI-Control PSO</i>	74
Gambar 4.35 Hasil Frekuensi Simulasi Plant <i>PSO</i>	75
Gambar 4.36 Hasil Rekam Hasil Frekuensi Fungsi Waktu <i>PSO</i>	75
Gambar 4.37 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant <i>PSO</i>	76
Gambar 4.38 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu <i>PSO</i>	76
Gambar 4.39 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant <i>PSO</i> Dalam Satuan pu	77
Gambar 4.40 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu <i>PSO</i>	77
Gambar 4.41 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan Keluaran WT	83
Gambar 4.42 Hasil Simulasi Arus, Tegangan dan SOC Baterai Skenario Baterai-WT	84
Gambar 4.43 Hasil Simulasi Daya Baterai Skenario Baterai-WT	84
Gambar 4.44 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Baterai Skenario <i>Hybrid Storage-WT</i>	85
Gambar 4.45 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Superkapasitor Skenario <i>Hybrid Storage-WT</i>	86
Gambar 4.46 Hasil Simulasi Perbandingan Daya Baterai dan Superkapasitor Skenario <i>Hybrid Storage-WT</i>	87

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Pelacakan Aliran Daya [1].....	8
Tabel 3.1 Parameter Plant PLTA tanpa LFC (sebagai Voltage Control DG).....	30
Tabel 4.1 Dummy IEEE 9-Bus P-Losses Tracing	36
Tabel 4.2 Dummy IEEE 9-Bus Q-Losses Tracing.....	38
Tabel 4.3 IEEE 9-Bus Off-Grid Simulation Parameter	40
Tabel 4.4 IEEE 9-Bus Off-Grid P-Losses Tracking Simulation.....	41
Tabel 4.5 IEEE 9-Bus Off-Grid Q-Losses Tracking Simulation.....	42
Tabel 4.6 IEEE 9-Bus On-Grid Simulation Parameter	43
Tabel 4.7 IEEE 9-Bus On-Grid P-Losses Tracking Simulation	43
Tabel 4.8 IEEE 9-Bus On-Grid Q-Losses Tracking Simulation.....	44
Tabel 4.9 Perbandingan Frekuensi Simulasi PLTA.....	77
Tabel 4.10 Perbandingan Tegangan Simulasi PLTA.....	78
Tabel 4.11 Perbandingan Daya Simulasi PLTA	78
Tabel 4.12 Tabel kebutuhan maksimal per kWh tiap skenario Off-Grid 3 DG....	92

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama satu dekade terakhir, persaingan telah ada dalam industri tenaga listrik di banyak negara, yang dideregulasi dari organisasi yang terintegrasi secara terpusat. Di pasar listrik yang kompetitif, ada sejumlah masalah penting yang harus diselesaikan. Salah satu masalah yang paling penting adalah mengembangkan skema penetapan harga transmisi yang efisien. Pelacakan aliran daya, sering digunakan untuk menghitung kontribusi masing-masing generator dan beban ke aliran cabang, atau transfer daya antara masing-masing generator dan beban, menyediakan alat yang tersedia untuk menyelesaikan masalah ini.

Dengan adanya deregulasi industri tenaga listrik, alokasi biaya layanan transmisi kepada pengguna secara adil menjadi jauh lebih signifikan. Untuk memastikan perhitungan yang adil dari harga semua transaksi power wheeling di lingkungan kompetitif yang baru ini, perlu diketahui bagaimana setiap peserta pasar memanfaatkan jaringan transmisi. Informasi ini dapat ditentukan hanya jika jalur pengiriman daya dari sumber ke beban dan jumlahnya didapat dengan penelusuran aliran daya [1]. Namun, sangat sulit untuk menjawab pertanyaan ‘bagian mana dari aliran cabang?’ dan ‘berapa rugi-rugi yang didapatkan dari jalur sumber menuju beban tertentu?’ dalam sistem tenaga nonlinier [2]. Dengan demikian, satu masalah rumit yang telah menarik banyak peneliti adalah menemukan solusi yang diterima secara luas untuk masalah penelusuran aliran daya, termasuk penelusuran rugi-rugi daya aktif dan reaktif.

Sudah umum diketahui bahwa sistem kelistrikan yang berlaku di Indonesia saat ini akan menjadi tidak *reliable* jika terjadi gangguan N-3, bahkan mampu menyebabkan *blackout* pada suatu wilayah tertentu. Dibutuhkan sebuah rencana cadangan untuk mengantisipasi hal tersebut. Dalam konteks ini penulis menawarkan pemakaian sebuah sistem kelistrikan berbasis energi terbarukan karena memiliki keuntungan dalam hal bahan bakar yang dipakai akan selalu

tersedia [3]. Pembangkit dari sumber energi terbarukan seperti air, angin, dan matahari.

Dalam pengaplikasian dari sistem kelistrikan rencana cadangan ini, dibutuhkan sebuah regulasi penentuan harga. Penentuan harga transaksi energi listrik antar pelanggan perlu mempertimbangkan beberapa hal. Adapun yang utama yaitu efisiensi dari pembangkit, *utility factor*, *load profile* dari pelanggan, dan juga *power generation profile* dari pembangkit itu sendiri untuk bisa menentukan harga investasi awal dari pembangkit yang akan dibuat. Sistemasi penentuan harga ini juga harus diketahui dengan jelas dari sumber apa sebuah beban tersebut bisa menyalurkan listrik karena investasi dari masing-masing pembangkit memiliki efisiensi yang berbeda. Maka dibutuhkan juga sebuah program untuk penentuan harga berbasis pelacakan aliran daya yang juga mempertimbangkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada suatu sistem transmisi.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti pada penelitian ini yaitu:

1. Menentukan model perbandingan efisiensi pada sampel beberapa pembangkit listrik tenaga energi terbarukan (air, angin, dan matahari).
2. Melakukan program pembebanan ekonomis pembangkit menggunakan *power flow tracing* pada sistem *Modified IEEE 9-Bus*.
3. Pembebanan ekonomis pembangkit dengan memperhitungkan rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif.
4. Pembebanan ekonomis pembangkit memperhatikan perbandingan efisiensi untuk menentukan harga tiap-tiap pelanggan dan desain Photovoltaic dan baterai.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui efisiensi dari setiap pembangkit dengan harga *installation cost* dan waktu balik modal yang sama menggunakan *economic simulation model*.

2. Mengetahui pembebanan pembangkit yang optimal untuk memenuhi kebutuhan beban dengan kapasitas saluran transmisi yang sama untuk berbagai jenis pembangkit.
3. Mengetahui rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif berdasarkan kapasitas saluran transmisi.
4. Menentukan kapasitas pembangkit tenaga energi terbarukan serta harga optimal untuk setiap pelanggan terhadap setiap pembangkit dalam kondisi normal.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Semua set pembangkit (pembangkit dan penyimpan energi) diasumsikan selalu beroperasi secara komplementer.
2. Lokasi konstruksi pembangkit terhadap pelanggan diasumsikan selalu sama.
3. Sistem yang digunakan adalah *IEEE 9 Bus*.
4. Pembebanan pada setiap pelanggan dianggap selalu sama.
5. *Energy storage* yang digunakan adalah baterai.
6. Rugi umur baterai diabaikan.
7. Kapasitas hantar arus saluran transmisi diabaikan.
8. Saluran transmisi pada seluruh sistem dianggap sama.
9. Simulasi dilakukan di *ETAP* dan *Matlab R2018a*.
10. Hanya melakukan simulasi untuk kondisi normal.
11. Harga dalam Rupiah.

1.5 Kontribusi

Kontribusi yang diharapkan dari hasil penelitian adalah dengan adanya penambahan *constraint* berupa efisiensi pembangkit yang dilakukan saat keadaan normal dapat membantu menentukan harga transfer daya listrik untuk setiap pelanggan yang berbeda dari beberapa pembangkit yang berbeda dan menentukan jenis pembangkit yang akan digunakan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Kajian pustaka penelitian ini berisi tentang kajian penelitian terkait dan dasar teori. Kajian penelitian terkait ini berisi tentang sumber referensi penelitian sebelumnya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian ini sebagai pembaharuan penelitian. Kajian penelitian terkait ini berisi tentang *power flow tracing* yang diterapkan pada penentuan jenis pembangkit energi terbarukan yang akan dipakai, efisiensi pembangkit, dan untuk penentuan harga menggunakan optimasi fungsi biaya dan investasi awal pembangkit. Dasar teori penunjang yang terdapat pada bab ini dibagi menjadi beberapa sub bab yaitu tentang *power flow tracing*, *water turbine*, *wind turbine*, *photovoltaic*, karakteristik beban dan *renewable energy generation cost model*.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Smart Grid saat ini dianggap sebagai “*The Next Generation Electricity Supply*” untuk perspektif masa depan dan muncul sebagai sarana kombinasi dari teknologi informasi dengan bidang teknologi sistem tenaga dan bidang teknologi telekomunikasi [4]. Ide dan konsep dasar dari *Smart Grid* adalah peningkatan terhadap jaringan kelistrikan yang sudah ada dengan kombinasi teknologi *artificial intelligence* [5]. *Smart Grid* juga memiliki fungsi *Self-Healing* yang bisa membantu menyelesaikan permasalahan kegagalan dalam kelistrikan termasuk *blackout* selama perekaman dan penyimpanan data menuju *Smart Meter* di dalam *semantic reservoir* [6], [7]. Namun *Smart Meter* saat ini memiliki kekurangan fitur untuk melacak darimana dan menuju ke arah mana aliran daya yang mengalir, sehingga perlu ada sebuah sistem yang dapat mengetahui dan melakukan *monitoring* dari aliran daya sebuah jaringan.

Untuk melakukan penentuan harga terhadap pelanggan dengan sistem *off-grid*, perlu dilakukan *Power Flow Analysis* atau analisa aliran daya. Analisis ini bertujuan untuk mencari aliran daya yang optimal pada sistem sehingga sistem dapat beroperasi dengan biaya minimal sesuai dengan kebutuhan beban [9].

Penelitian terkait sebelumnya yang pernah membahas tentang *Power Pricing* atau penentuan harga daya listrik dibahas pada penelitian Xin-Wu Li. Pada penelitian tersebut dilakukan penentuan harga dengan mempertimbangkan perbedaan wilayah dan kecenderungan pembelian listrik pada berbagai level kapasitas daya [10]. Namun kekurangan dari penelitian ini hanya memberikan formula pasti untuk penentuan harga tiap satuan listrik tanpa menyebutkan asal dari aliran daya yang tersebar menuju pelanggan.

Beberapa studi telah dilakukan untuk menganalisis tentang aliran daya optimal dalam rentang waktu tertentu dengan mempertimbangkan kemacetan aliran daya. Adapun yang membahas tentang *Power Pricing* dari pembangkit listrik tenaga angin yang memperhitungkan naik-turunnya daya terbangkit [11], namun tidak memperhitungkan rugi-rugi daya. Kemudian penelitian *Power Flow Congestion Management* yang dilakukan oleh Hetong Wang, et al yang menggunakan *IEEE 9-Bus System* sebagai objek simulasi [12], didapatkan bahasan yang hanya memberikan perhitungan rugi-rugi daya aktif dari sistem tanpa memperhitungkan *incremental cost* dan penentuan harga daya per satuan listrik. Maka dari kekurangan kedua penelitian ini, penulis akan mencoba untuk melakukan *Power Pricing* dengan memperhitungkan rugi-rugi daya.

Untuk memastikan perhitungan dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya ini benar, maka yang harus dipastikan kembali yaitu perhitungan pada *software ETAP*. Studi yang telah dilakukan yaitu dengan menggunakan generator pada *software ETAP* dengan menggunakan *IEEE 9-Bus* ini seperti yang dilakukan oleh Divya Asija, et al, yaitu tentang pemodelan sistem ini pada *software MATLAB* [13]. Pada pemodelan sistem *IEEE 9-Bus* yang akan digunakan untuk menentukan harga, maka harus dilakukan juga pemodelan sistem *IEEE 9-Bus* pada *software MATLAB* dengan memperhitungkan rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif. Penelitian dari J. Nazaran, et al yang membuat pemodelan untuk *Modified Bus IEEE 9-Bus* menjadi *15-Bus* [14]. Dari kedua penelitian ini memberikan hasil yang lebih bagus dengan metode konvensional namun masih belum bisa diterapkan untuk sistem *Islanded Microgrid*.

Islanded Microgrid yang berbasis *Smart Grid* adalah sebuah jaringan listrik lokal dengan kemampuan kendali, yang berarti dapat bekerja secara terpisah,

namun bisa dikendalikan melalui *Smart Meter* [15]. Generator yang digunakan dalam *Islanded Microgrid* pun juga memiliki spesifikasi yang sama layaknya Generator pada *Main Grid*, harus dengan keandalan yang tinggi, dengan beberapa *backup system* [16] seperti baterai untuk pembangkit listrik tenaga energi terbarukan *Photovoltaic*. Untuk memenuhi syarat menjadi bagian dari *Smart Grid* semua aspek yang mendukung transfer daya harus *environmentally friendly* [17]. Penelitian yang telah menggunakan basis *Smart Grid* seperti yang dilakukan oleh Sai Fai Hui, et al menjelaskan tentang aliran daya yang dilakukan dengan penggunaan *Photovoltaic* sebagai generator utama [18]. Sedangkan *backup system installation cost* dan harga balik modal untuk *Photovoltaic* dibahas pada penelitian Ei-ichi Imamura, et al [19]. Penelitian Chathurika Chandraratne, et al menunjukkan bahwa keandalan sistem *Smart Grid* sudah cukup baik dengan memodifikasi peralatan proteksi pada relay [20]. Tetapi hingga saat ini belum ada yang membahas tentang penentuan harga untuk transfer daya listrik antar pelanggan. Hal ini menjadi alasan penulis dengan menggabungkan referensi [4]–[20] untuk melakukan penelitian tentang penentuan harga transfer daya listrik dengan menggunakan metode *Power Flow Tracing* berbasis sistem *Smart Grid* dengan mempertimbangkan *backup system installation cost* dan harga balik modal.

2.2 Teori Dasar

Dasar teori berdasarkan kajian pustaka yang melatarbelakangi permasalahan penelitian yang dilakukan yaitu:

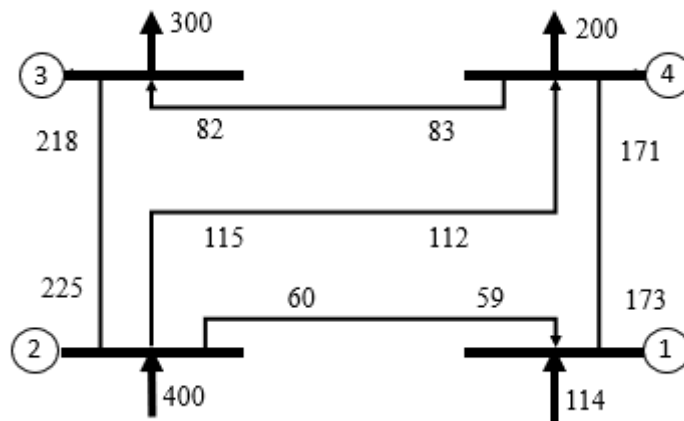
2.2.1 *Power Flow Tracing* [1][2][14]

Pelacakan aliran daya telah mendapat keutamaan lebih dalam beberapa tahun terakhir dikarenakan situasi deregulasi dan akses terbuka dalam industri listrik. Sehingga diperlukan untuk menghitung transfer daya dari masing-masing generator ke beban dan cabang, bagian dari masing-masing beban dan pembangkit dalam aliran cabang. Adapun persamaan power balance tersebut memiliki bentuk sebagai berikut::

$$P_i^g = \sum_{j \in \alpha} |P_{ij}| + P_g \text{ untuk } i = 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Dengan keterangan $P_{i\bar{s}}$ adalah daya tidak diketahui yang melewati i . P_{ij} adalah daya tidak diketahui yang melewati i menuju ke j . Sedangkan untuk P_g adalah daya terbangkit pada bus i .

Prinsip pembagian proporsional pada dasarnya sama dengan mengasumsikan bahwa simpul jaringan adalah "pencampur" sempurna dari aliran arus yang masuk sehingga tidak mungkin untuk mengetahui elektron masuk mana yang masuk ke jalur keluar mana. Ini tampaknya masuk akal dan bahwa listrik tidak dapat dibedakan.



Gambar 2.1 Contoh aliran daya yang bisa terlacak pada sistem 4 bus [1]

Tabel 2.1 Parameter Pelacakan Aliran Daya [1]

Parameter	Simbol
Daya Terbangkit (MVA)	S
Daya Aktif (MW)	P
Daya Reaktif (MVAR)	Q
Resistansi (Ω)	r
Reaktansi (Ω)	x
Bus Pada Sistem	n

2.2.2 Water Turbine [15][16]

Turbin air adalah alat untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk pembangkit tenaga listrik. Dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTA) turbin air

merupakan peralatan utama selain generator [15]. Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi.

Turbin berfungsi untuk mengubah energi potensial menjadi energi mekanik. Gaya jatuh air yang mendorong baling-baling menyebabkan turbin berputar. Turbin air kebanyakan seperti kincir angin, dengan menggantikan fungsi dorong angin untuk memutar baling-baling digantikan air untuk memutar turbin. Perputaran turbin ini di hubungkan ke generator.

Aliran air yang mempunyai energi potensial akan disemprotkan ke sudu-sudu turbin oleh nozzle. Putaran dari sudu-sudu tersebut akan mengakibatkan poros turbin ikut bergerak dan kemudian putaran poros turbin akan diteruskan ke generator listrik untuk diubah menjadi energi listrik.

Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi.[3]

Turbin impuls adalah turbin air yang cara kerjanya merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial + tekanan + kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi kinetik. Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nozzle. Air keluar nozzle yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impulse). Akibatnya roda turbin akan berputar. Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari nozzle tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Contoh turbin impuls adalah turbin Pelton.

Turbin reaksi adalah turbin yang cara kerjanya merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi kinetik. Turbin jenis ini adalah turbin yang paling banyak digunakan. Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga runner (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini

dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Runner turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.

Turbin reaksi disebut juga dengan turbin tekanan lebih karena tekanan air sebelum masuk roda turbin lebih besar dari pada tekanan air saat keluar roda turbin. Secara umum dapat dikatakan bahwa aliran air yang masuk ke roda turbin mempunyai energi penuh, kemudian energi ini dipakai sebagian untuk menggerakkan roda turbin dan sebagian lagi dipergunakan untuk mengeluarkan air kesaluran pembuangan. Jenis turbin reaksi yang sering digunakan antara lain, turbin francis, turbin propeler atau kaplan.[3]

Berdasarkan arah alirannya, turbin dikelompokkan menjadi 2 kelompok, yaitu turbin aliran radial dan turbin aliran aksial.

Turbin aliran radial adalah turbin yang arah alirannya tegak lurus dengan arah putaran poros turbin. Turbin dengan aliran radial digunakan untuk laju alir (aliran *working fluid*) rendah dan dengan perbedaan tekanan (*difference pressure*) tinggi.

Turbin aliran aksial adalah turbin yang sejajar dengan arah putaran poros turbin. Turbin dengan aliran aksial digunakan untuk laju alir tinggi dan dengan perbedaan tekanan rendah (1 – 40 bar). *Axial-flow turbines* kebanyakan digunakan dalam aplikasi yang melibatkan fluida kompresibel. Dalam banyak penggunaan, efisiensi *Axial-flow turbines* lebih tinggi dibandingkan *radial-inflow turbines*.

2.2.3 Wind Turbine [3][11]

Turbin angin, atau secara alternatif disebut sebagai konverter energi angin, adalah perangkat yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik.

Turbin angin diproduksi dalam berbagai sumbu vertikal dan horizontal. Turbin terkecil digunakan untuk aplikasi seperti pengisian baterai untuk daya tambahan untuk kapal atau karavan atau untuk menyalakan rambu peringatan lalu lintas. Turbin yang lebih besar dapat digunakan untuk memberikan kontribusi sebagai catu daya domestik sambil menjual daya yang tidak digunakan kembali ke pemasok utilitas melalui jaringan listrik (PLN). Susunan turbin besar, yang dikenal sebagai ladang angin, menjadi sumber energi terbarukan yang semakin penting dan digunakan oleh banyak negara sebagai bagian dari strategi untuk mengurangi

ketergantungan mereka pada bahan bakar fosil. Adapun pendapat bahwa pada 2009, angin memiliki "emisi gas rumah kaca yang relatif terendah, permintaan konsumsi air yang paling rendah dan dampak sosial paling menguntungkan" dibandingkan dengan fotovoltaik, hidro, panas bumi, batubara dan gas.

Konservasi massa mensyaratkan bahwa jumlah udara yang masuk dan keluar turbin harus sama. Dengan demikian, hukum Betz memberikan ekstraksi tenaga angin maksimal yang dapat dicapai oleh turbin angin sebesar $16/27$ (59,3%) dari total energi kinetik udara yang mengalir melalui turbin.[11]

Dengan demikian, output daya teoretis maksimum dari mesin angin adalah $16/27$ kali energi kinetik udara yang melewati area disk efektif mesin.

Efisiensi angin-ke-rotor (termasuk gesekan dan hambatan bilah rotor) adalah beberapa faktor yang mempengaruhi harga akhir tenaga angin. Inefisiensi lebih lanjut, seperti kehilangan gearbox, kehilangan generator dan konverter, mengurangi daya yang disalurkan oleh turbin angin. Untuk melindungi komponen dari keausan yang tidak semestinya, daya yang diekstraksi tetap konstan di atas kecepatan operasi terukur karena daya teoretis meningkat pada kubus kecepatan angin, yang selanjutnya mengurangi efisiensi teoritis. Pada tahun 2001, turbin yang terhubung dengan utilitas komersial menghasilkan 75% hingga 80% dari batas daya Betz yang dapat diekstraksi dari angin, pada kecepatan operasi terukur.

Efisiensi dapat berkurang sedikit dari waktu ke waktu, salah satu alasan utama menjadi debu dan bangkai serangga pada blade yang mengubah profil aerodinamik dan pada dasarnya mengurangi rasio angkat dan seret airfoil. Analisis 3128 turbin angin lebih tua dari 10 tahun di Denmark menunjukkan bahwa setengah dari turbin tidak mengalami penurunan, sementara setengah lainnya mengalami penurunan produksi 1,2% per tahun. Akresi es pada bilah turbin juga telah terbukti sangat mengurangi efisiensi turbin angin, yang merupakan tantangan umum di daerah beriklim dingin di mana peristiwa pendinginan dan pembekuan awan di awan terjadi. Desain turbin vertikal memiliki efisiensi jauh lebih rendah daripada desain horizontal standar.

Secara umum, kondisi cuaca yang lebih stabil dan konstan (terutama kecepatan angin) menghasilkan rata-rata efisiensi 15% lebih besar daripada turbin angin dalam kondisi cuaca tidak stabil, sehingga memungkinkan peningkatan

kecepatan angin hingga 7% dalam kondisi stabil. Hal ini disebabkan pemulihan pemulihan yang lebih cepat dan aliran masuk yang lebih besar yang terjadi dalam kondisi stabilitas atmosfer yang lebih tinggi. Namun, bangun turbin angin telah ditemukan untuk pulih lebih cepat dalam kondisi atmosfer yang tidak stabil dibandingkan dengan lingkungan yang stabil.

Bahan yang berbeda telah ditemukan memiliki efek yang bervariasi pada efisiensi turbin angin. Dalam percobaan Ege University, tiga turbin angin (Masing-masing dengan tiga bilah dengan diameter satu meter) dibangun dengan bilah yang terbuat dari bahan yang berbeda: A gelas dan epoksi kaca / karbon, kaca / karbon, dan kaca / poliester. Ketika diuji, hasilnya menunjukkan bahwa bahan dengan massa keseluruhan yang lebih tinggi memiliki momen gesekan yang lebih besar dan dengan demikian koefisien daya yang lebih rendah.

Turbin angin dapat memutar sumbu horizontal atau vertikal, yang pertama lebih tua dan lebih umum. Mereka juga bisa termasuk mata pisau, atau tanpa pisau. Desain vertikal menghasilkan lebih sedikit daya dan lebih jarang terjadi.

Turbin yang digunakan di ladang angin untuk produksi komersial tenaga listrik biasanya berbilah tiga. Ini memiliki riak torsi rendah, yang berkontribusi terhadap keandalan yang baik. Pisau biasanya berwarna putih untuk visibilitas siang hari oleh pesawat dan panjangnya berkisar dari 20 hingga 80 meter (66 hingga 262 kaki). Ukuran dan ketinggian turbin meningkat dari tahun ke tahun. Turbin angin lepas pantai dibangun hingga 8 MW saat ini dan memiliki panjang bilah hingga 80 meter (260 kaki). Desain dengan 10 hingga 12 MW sedang dalam persiapan. [32] Turbin multi megawatt biasa memiliki menara baja tubular dengan ketinggian 70 m hingga 120 m dan ekstrem hingga 160 m.

2.2.4 Photovoltaic [18][19]

Sel surya adalah suatu perangkat yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan mengikuti prinsip fotovoltaiik, yaitu adanya energi foton pada panjang gelombang tertentu akan mengeksitasi sebagian elektron pada suatu material ke pita energi yang lebih luar.

Sel Surya atau Solar Cell adalah suatu perangkat atau komponen yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan

menggunakan prinsip efek Photovoltaic. Yang dimaksud dengan Efek Photovoltaic adalah suatu fenomena dimana munculnya tegangan listrik karena adanya hubungan atau kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Oleh karena itu, Sel Surya atau Solar Cell sering disebut juga dengan Sel Photovoltaic (PV). Efek Photovoltaic ini ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839.[18]

Arus listrik timbul karena adanya energi foton cahaya matahari yang diterimanya berhasil membebaskan elektron-elektron dalam sambungan semikonduktor tipe N dan tipe P untuk mengalir. Sama seperti Dioda Foto (Photodiode), Sel Surya atau Solar Cell ini juga memiliki kaki Positif dan kaki Negatif yang terhubung ke rangkaian atau perangkat yang memerlukan sumber listrik.

Pada dasarnya, Sel Surya merupakan Dioda Foto (Photodiode) yang memiliki permukaan yang sangat besar. Permukaan luas Sel Surya tersebut menjadikan perangkat Sel Surya ini lebih sensitif terhadap cahaya yang masuk dan menghasilkan Tegangan dan Arus yang lebih kuat dari Dioda Foto pada umumnya. Contohnya, sebuah Sel Surya yang terbuat dari bahan semikonduktor silikon mampu menghasilkan tegangan setinggi 0,5V dan Arus setinggi 0,1A saat terkena (expose) cahaya matahari.

Saat ini, telah banyak yang mengaplikasikan perangkat Sel Surya ini ke berbagai macam penggunaan. Mulai dari sumber listrik untuk Kalkulator, Mainan, pengisi baterai hingga ke pembangkit listrik dan bahkan sebagai sumber listrik untuk menggerakkan Satelit yang mengorbit di Bumi.

Sinar Matahari terdiri dari partikel sangat kecil yang disebut dengan Foton. Ketika terkena sinar Matahari, Foton yang merupakan partikel sinar Matahari tersebut menghantam atom semikonduktor silikon Sel Surya sehingga menimbulkan energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang terpisah dan bermuatan Negatif (-) tersebut akan bebas bergerak pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor. Atom yang kehilangan Elektron tersebut akan terjadi kekosongan pada strukturnya, kekosongan tersebut dinamakan dengan "hole" dengan muatan Positif (+).

Daerah Semikonduktor dengan elektron bebas ini bersifat negatif dan bertindak sebagai Pendonor elektron, daerah semikonduktor ini disebut dengan Semikonduktor tipe N (N-type). Sedangkan daerah semikonduktor dengan Hole bersifat Positif dan bertindak sebagai Penerima (Acceptor) elektron yang dinamakan dengan Semikonduktor tipe P (P-type).

Di persimpangan daerah Positif dan Negatif (PN Junction), akan menimbulkan energi yang mendorong elektron dan hole untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi daerah Negatif sedangkan Hole akan bergerak menjauhi daerah Positif. Ketika diberikan sebuah beban berupa lampu maupun perangkat listrik lainnya di Persimpangan Positif dan Negatif (PN Junction) ini, maka akan menimbulkan Arus Listrik.[19]

Panel surya dengan kapasitas 1 kWp dapat menghasilkan listrik selama 8 jam dari pukul 08.00 sampai 16.00. Dengan intensitas sinar matahari di Indonesia, total yang dihasilkan kurang lebih 3,5 kWh. Maka konsumsi listrik dari PLN berkurang 3,5 kWh per hari atau setara dengan Rp 5.000 (tarif listrik PLN Rp 1.400/kWh). Berarti dalam sebulan, tagihan listrik berkurang Rp 150.000.

2.2.5 Karakteristik beban [8][20]

Permintaan beban pada sistem tenaga diatur oleh konsumen dan untuk sistem penyediaan industri dan konsumen domestik, itu bervariasi dalam batas yang luas. Variasi beban ini dapat dianggap dalam harian, mingguan, bulanan atau tahunan. Kurva beban khas untuk sistem listrik yang besar ditunjukkan pada Gambar. 3.5. Kurva ini adalah untuk satu hari selama satu tahun dan ini menunjukkan beban yang dituntut oleh konsumen pada waktu tertentu. Kurva beban tersebut disebut sebagai "Kurva Kronologis beban". Jika koordinat kronologis beban kurva diatur dalam urutan menurun besarnya dengan koordinat tertinggi di kiri, maka diperoleh tipe baru kurva beban yang dikenal sebagai "Kurva durasi beban".

Jika setiap titik diambil pada kurva ini maka absis dari titik ini akan menunjukkan jumlah jam per tahun selama beban melebihi nilai yang dinotasikan dengan ordinatnya. Tipe lain dari kurva yang dikenal sebagai "kurva beban energi" atau "kurva durasi terintegrasi". Kurva ini diplot antara beban di kW atau MW dan

total energi yang dihasilkan dalam kWh. Jika setiap titik diambil pada kurva ini, absis dari titik ini menunjukkan total energi dalam kWh yang dihasilkan pada atau di bawah beban yang diberikan oleh ordinat dari titik ini.

Kurva seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.5. Pada Gambar. 3.5 (b), bagian bawah kurva yang terdiri dari beban yang harus disediakan untuk hampir seluruh jumlah jam dalam satu tahun, mewakili "Beban Dasar", sedangkan bagian atas, yang terdiri dari beban yang diperlukan untuk relatif beberapa jam per tahun, merupakan "Beban Puncak".

2.2.6 Renewable Energy Generation Cost Model [10]

Berikut ini adalah biaya terkini untuk setiap pembuatan pembangkit berbasis *renewable energy*. Rata-rata memiliki investasi awal yang sangat tinggi namun akan berkurang dari berjalannya waktu dan hanya dibatasi oleh sebuah susut umur dari jenis pembangkit tersebut. Mengingat intensitas pemakaian pembangkit pada beban dasar ataupun beban puncak yang nantinya akan menjadi bahan pertimbangan dalam penelitian penentuan harga ini.[10]

Pada 2019, turbin angin mungkin menelan biaya sekitar \$ 1 juta per megawatt. Untuk bilah turbin angin, sementara biaya bahannya jauh lebih tinggi untuk bilah kaca serat karbon / bilah serat karbon daripada semua bilah serat kaca, biaya tenaga kerja bisa lebih rendah. Menggunakan serat karbon memungkinkan desain yang lebih sederhana yang menggunakan bahan baku lebih sedikit. Proses pembuatan utama dalam fabrikasi blade adalah melapisi lapisan. Pisau yang lebih tipis memungkinkan pengurangan jumlah lapisan dan tenaga kerja, dan dalam beberapa kasus, menyamakan dengan biaya tenaga kerja untuk pisau serat kaca.

Sedangkan untuk turbin air memiliki fungsi biaya yang disesuaikan dengan efisiensinya. Bila parameter daya yang diperlukan telah diperoleh maka dapat dihitung tingkat efisiensi yang ada pada turbin dan generator. Efisiensi turbin merupakan rasio antara daya hidrolisis yang tersedia dengan daya turbin yang dihasilkan. Sedangkan efisiensi generator merupakan rasio antara daya turbin yang ada dengan daya generator yang dihasilkan oleh generator.

Setiap turbin air memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Sehingga diperlukan pemilihan yang tepat agar diperoleh kesesuaian antara energi yang tersedia serta energi yang ingin dihasilkan. Pada dasarnya, pada, tinggi jatuh air (head) dan debit aliran merupakan faktor utama yang bekerja pada turbin air. Perbedaan jenis turbin mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap nilai head serta debit yang tersedia pada aliran. Faktor daya yang ingin dihasilkan juga menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan turbin. Untuk menghasilkan daya yang sesuai, maka diperlukan turbin yang bekerja secara optimal pada head dan debit yang tersedia. Selain itu, kecepatan spesifik juga dapat mempengaruhi pemilihan turbin. Sebagai contoh, turbin dengan kecepatan spesifik yang besar akan berbeda daya yang dihasilkan dibandingkan dengan turbin dengan kecepatan spesifik yang rendah pada penggunaan sistem transmisi generator yang sama.

Sedangkan untuk sel surya sendiri, harga panel surya di Indonesia saat ini berada di kisaran US\$ 1/Watt peak (Wp) atau US\$ 1.000/kilowatt peak (kWp). Tiga tahun lalu, harga solar panel masih sekitar US\$ 1.500/kWp, jadi sudah menurun sekitar 30% dalam 3 tahun (PLN). Jika dikonversi dalam rupiah, harga panel surya dengan kapasitas 1 kWp sekitar Rp 13,2 juta. Ditambah biaya instalasi di atap rumah, biayanya sekitar Rp 15 juta/kWp. Untuk kebutuhan listrik rumah tangga, kira-kira perlu 1-2 kWp alias 1.000-2.000 Watt peak (Wp). Sekarang sudah semakin banyak rumah-rumah yang memakai panel surya di atap untuk memenuhi kebutuhan listrik pada siang hari. Tapi pemakainya masih terbatas di masyarakat kelas menengah atas. Sebab, biaya yang dibutuhkan setidaknya Rp 15 juta, belum terjangkau masyarakat Indonesia pada umumnya. Meski demikian, uang yang diinvestasikan untuk memasang panel surya bisa segera kembali dalam sekitar 4 tahun (panel surya saja, tanpa baterai). Panel surya memberi manfaat langsung berupa penghematan tagihan listrik.

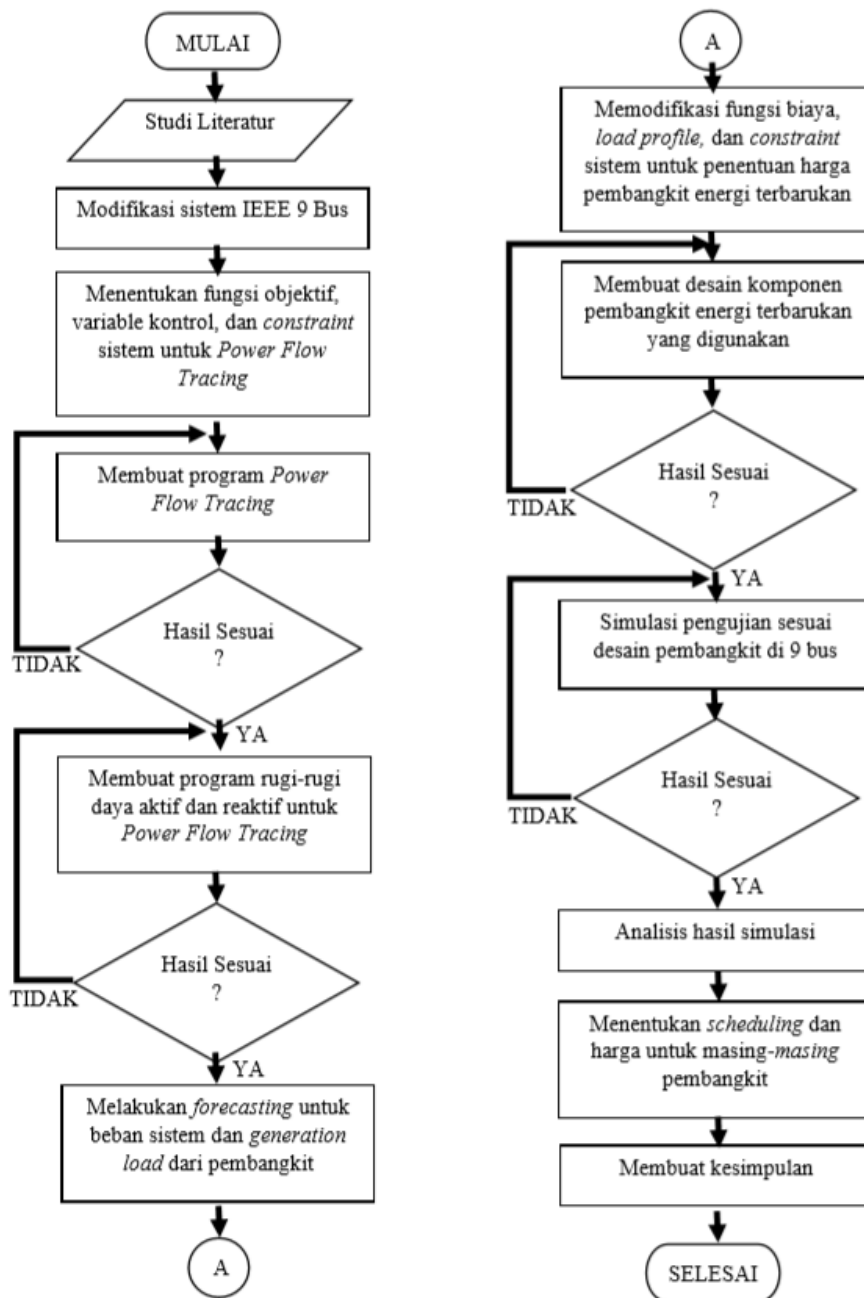
Di tahun setelah masa balik modal dan seterusnya, pemilik rumah sudah menikmati keuntungan dari panel surya. Energi dari sinar matahari tentu tak akan habis, hanya mahal di awal saja tapi selanjutnya sangat murah, dan tidak menghasilkan polusi seperti halnya energi fosil.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang desain sistem, langkah penelitian, dan metode yang digunakan dalam penelitian. Langkah penelitian dijelaskan melalui flowchart dan digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Sistematika pengerjaan penelitian digambarkan pada flowchart gambar 3.1 dimulai dengan studi literatur yaitu mencari dan membaca referensi dari beberapa penelitian terkait yang telah dilakukan. Hal itu berfungsi untuk mengetahui bahwa penelitian yang diusulkan oleh penulis dapat dikerjakan. Setelah studi literatur dilakukan, maka hal selanjutnya yang dilakukan ialah memodelkan dan memodifikasi sistem yang digunakan yaitu IEEE 9 bus. IEEE 9 bus digunakan karena adanya kemiripan dari IEEE 9 bus dalam hal kepemilikan pembangkit dari sebuah sistem kelistrikan industri. Sistem kelistrikan industri sendiri ada beberapa yang tidak terkoneksi dengan jaringan sehingga lebih mudah dalam korelasi dengan studi kasus yang akan dilakukan. Simulasi sistem akan dimodifikasi dengan pengubahan pembangkit menjadi pembangkit energi terbarukan. IEEE 9 bus digunakan untuk melakukan validasi program yang telah dibuat dan juga digunakan untuk analisis penelitian.

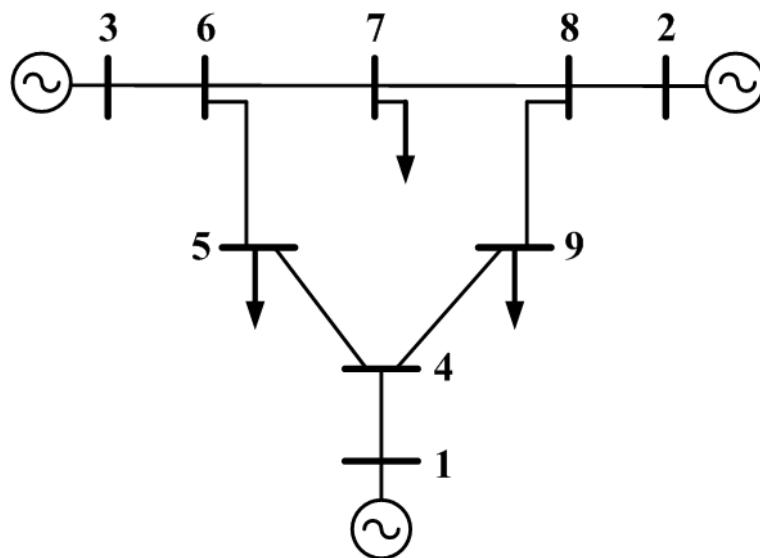
Langkah selanjutnya ialah menentukan fungsi objektif, variable kontrol, constraint untuk *power flow tracing*. Lalu hal tersebut digunakan dalam langkah pembuatan program untuk validasi terlebih dahulu. Pembuatan program dilakukan dengan menggunakan logika *Incidence Matrix* dalam kondisi tanpa rugi-rugi. Jika hasil validasi dengan ETAP sesuai dengan yang diinginkan, maka pembuatan program dilanjutkan pada beberapa kondisi yaitu tanpa rugi-rugi, dengan rugi-rugi daya aktif, dan dengan rugi-rugi daya reaktif dengan cara memberikan *pseudo-bus* atau bus semu diantara kedua bus yang memiliki beban reaktif sebagai representasi dari *line charging* pada *transmission line*. Checking program dilakukan dengan kedua *software* baik ETAP maupun matlab pada setiap pembuatan program dengan tujuan melihat program dapat bekerja dengan baik. Apabila program belum menunjukkan hasil yang baik, maka dilakukan perubahan program hingga mencapai hasil yang diinginkan.

Setelah pembuatan program dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah dengan melakukan *forecasting* untuk beban sistem dan *generation load* dari masing-masing pembangkit yang akan digunakan. Jika sudah sesuai maka dilanjutkan dengan modifikasi fungsi biaya, *load profile*, dan constraint untuk penentuan harga (termasuk penentuan pembangkit untuk *base load* atau sebagai *peaker*). Selanjutnya penelitian dilakukan pada beberapa studi kasus *water turbine*,

wind turbine, photovoltaic pada *yearly minimum load* berdasarkan *utility factor* dan *load diversity factor* dan pada *yearly maximum load* berdasarkan *utility factor* dan *load diversity factor* untuk beban industri dan beban rumah tangga.

Ada 3 studi kasus yang akan digunakan dalam langkah penentuan harga. Kasus 1 adalah memakai satu jenis pembangkit energi terbarukan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui daya optimal terbangkit untuk ketiga jenis pembangkit dalam satu lokasi yang sama. Kasus 2 adalah menggunakan kombinasi dari kedua atau ketiga jenis pembangkit dengan tujuan agar mengetahui kombinasi yang paling ekonomis dan realistis untuk setiap tipe pelanggan. Kasus 3 adalah menghilangkan salah satu dari ketiga pembangkit dengan asumsi ketiga tipe pembangkit digunakan. Hal ini bertujuan agar mengetahui cadangan kapasitas komponen pembangkit yang masih bekerja untuk menentukan investasi awal dari masing-masing pembangkit. Setelah melakukan 3 kasus tersebut, hal selanjutnya yang dilakukan adalah menganalisis hasil simulasi yang telah didapat dengan mempertimbangkan beberapa parameter yaitu daya pembangkitan tiap generator, daya pada beban tiap pelanggan, dan total biaya pembangkitan. Setelah didapatkan hasil analisa maka selanjutnya adalah menentukan penjadwalan dan penentuan harga untuk setiap pelanggan. Kemudian dilakukan langkah terakhir yaitu menarik kesimpulan penelitian.

3.1 Sistem IEEE 9 Bus



Gambar 3.2 Sistem IEEE 9-Bus

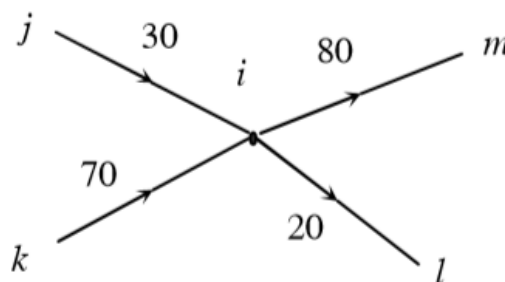
Penelitian ini menggunakan sistem IEEE 9 bus modifikasi untuk validasi program *power flow tracing*. Single line diagram sistem dapat dilihat pada gambar 3.2 yang memiliki 3 pembangkit. Modifikasi yang dilakukan yaitu mengubah 3 pembangkit yang ada sesuai dengan pembangkit yang akan digunakan.

3.2 Logika *Incidence Matrix*

Ini adalah salah satu langkah dalam pembuatan program *Power Flow Tracing* yang belum memperhitungkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif.

Pada dasarnya logika kontribusi daya dari generator terhadap aliran daya di saluran transmisi ini dirumuskan sebagai masalah optimasi multi-objektif dan diselesaikan menggunakan vektor paralel yang dievaluasi dengan algoritma *particle swarm optimization* sebagai penentu arah aliran daya masuk dan keluar namun dibutuhkan juga hasil dari *power flow* dari masing-masing pembangkit dengan prinsip pembagian proporsional.

Metode ini memiliki keuntungan sebagai berikut: hubungan antara aliran masuk dan keluar dalam sistem dan jalur yang ditelusuri dijelaskan secara eksplisit menggunakan jalur aliran yang diarahkan. Tanpa diperlukan pencarian yang lengkap dan inversi matriks seperti pada metode lainnya.



Gambar 3.3 Prinsip pembagian proporsional

Seperti pada contoh berikut, ada empat cabang yang terhubung ke bus i , dua cabang ($j-i$ dan $k-i$) dengan aliran masuk dan dua cabang ($i-m$ dan $i-l$) dengan arus keluar. Total injeksi daya ke dalam bus i adalah $P_i = 30 + 70 = 100\text{MW}$. Outflow 80MW cabang $i-m$ terdiri dari $30 \times 80/100 = 24\text{MW}$ dari cabang $j-i$ dan $70 \times 80/100 = 56\text{MW}$ dari cabang $k-i$. Demikian pula, arus keluar 20MW melalui cabang $i-l$ terdiri dari 6MW dari cabang $j-i$ dan 14MW dari cabang $k-i$.

$$i_{in} = i_{out} \quad (3.1)$$

Ada beberapa batasan untuk mendefinisikan kedalam bentuk matriks, untuk beda bus aliran daya ($i-j, j-k$, dll) sesuai dengan hasil *power flow*. Untuk sama bus ($i-i, j-j$, dll) dalam matriks akan ditulis 1, Untuk bus yang tidak berhubungan akan ditulis 0. Matriks akan menambah orde sejauh jalur bus ke bus sejumlah jalur transmisi yang dilewati. Sehingga bisa terhitung jelas sejumlah daya yang lewat dari bus pembangkit menuju bus beban.

Fungsi objektif dari *power flow tracing* adalah sebagai berikut:

$$P_{source \Rightarrow load} = P_{source} \times \prod_{bus=1}^N \frac{P_{bus}}{P_{inflowbus}} \times \frac{P_{load}}{P_{inflowload}} \quad (3.2)$$

Dengan bus sejumlah bus yang dilewati oleh aliran daya dari sumber menuju beban.

3.3 Pencarian rugi-rugi daya aktif dan reaktif

Ini adalah langkah lanjutan dalam pembuatan program *Power Flow Tracing* yang memperhitungkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif dengan tambahan *pseudo-bus* sebagai representatif beban reaktif

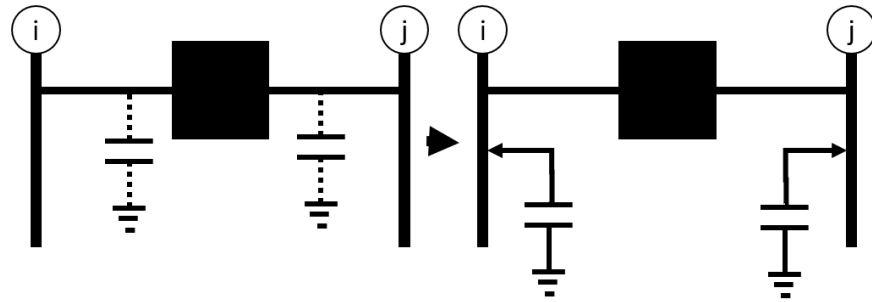
Untuk logika yang digunakan akan disamakan dengan logika *Incidence Matrix* untuk mempermudah dalam pengerjaan program, perbedaan terletak pada daya yang mengalir menjadi selisih antara daya terbangkit dengan daya yang sampai ke bus sehingga bisa dicari hambatan aktif dan hambatan reaktif (R dan X) sesuai dengan rumus berikut:

$$P = i^2 \times R \quad (3.3)$$

$$Q = i^2 \times X \quad (3.4)$$

$$i = \frac{S}{V} \quad (3.5)$$

Kemudian dari kedua hasil daya yang terhitung baik daya yang lewat dari bus-bus maupun rugi-rugi daya akan ditotal dan didapatkan daya total yang nantinya biaya total akan dibebankan kepada konsumen.

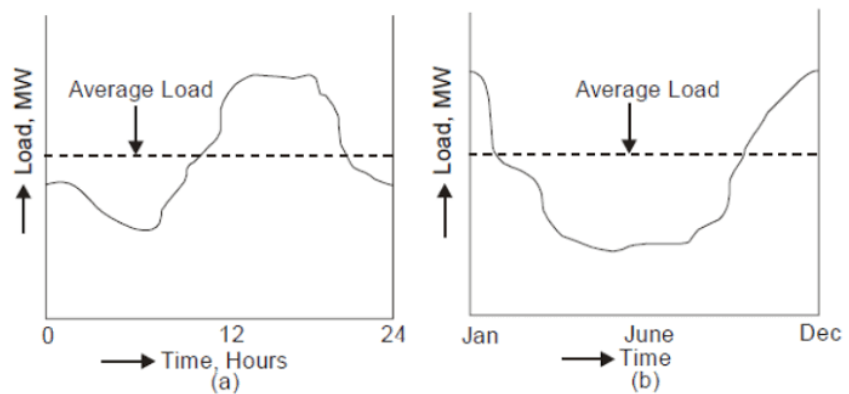


Gambar 3.4 Penambahan *pseudo-bus* sebagai beban reaktif

3.4 Forecasting beban dengan karakteristik beban

Ini adalah langkah untuk mengetahui beban yang sesuai kondisi dari masing-masing jenis pembangkit atau jenis beban sebelum melakukan studi kasus.

Karakteristik beban listrik suatu gardu sangat tergantung pada jenis beban yang dilayaninya. Hal ini akan jelas terlihat dan hasil pencatatan kurva beban suatu interval waktu. Berikut ini beberapa faktor yang menentukan karakteristik beban.



Gambar 3.5 Asumsi beban pada IEEE 9 bus sebagai *average load*

Asumsi diberikan untuk data load IEEE 9 bus untuk rata-rata tahunan dan rata-rata harian. Maka dibutuhkan peramalan dengan operasi matematika sederhana untuk menghitung puncak beban dengan tujuan menentukan pembangkit yang digunakan untuk *base load* dan pembangkit untuk *peaker*.

3.5 Pembentukan Fungsi Objektif

Fungsi Objektif pada Biaya Transaksi Energi adalah :

$$F = \min \sum_{time=1}^T \sum_{gen=1}^N F_{gencost} \times P_{gen} \quad (3.6)$$

Fungsi ini meminimalkan total biaya pembangkitan selama T interval waktu tertentu untuk N generator dari satu pelanggan ke pelanggan lain.

Fungsi objektif untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

$$F = \min \left(\sum_{gen=1}^N \%_{eff} \times F_{gencost} \times P_{gen} \right) + \left(\sum_{gen=1}^N F_{mtncost} \right) + F_{oprcost} \quad (3.7)$$

Dengan $F_{mtncost}$ adalah *maintenance cost* dari tiap-tiap komponen yang telah dibeli untuk setiap pembangkit, $F_{oprcost}$ adalah *operational cost* untuk total pembangkit yang ada, $F_{gencost}$ adalah *generation cost*, dan $\%_{eff}$ untuk efisiensi pembangkit sebagai *constraint* utama dalam penelitian ini agar bisa didapatkan harga yang paling sesuai.

3.6 Pembentukan Constraint

Untuk equality constraint dibuat efisiensi dalam setiap tingkat beban untuk perhitungan harga pelanggan.

- Perubahan efisiensi pada setiap perubahan daya terbangkit dan beban adalah 0.

$$\frac{\partial \%_{eff}}{\partial (P_{gen} - P_{load})} = 0 \quad (3.8)$$

- Keseimbangan daya aktif untuk setiap bus.

$$P_{gen} - P_{line} - P_{load} = 0 \quad (3.9)$$

- Daya pada saluran adalah jumlah anti reaktansi dikali selisih sudut tegangan pada bus sumber dan bus tujuan.

$$P_{line} = \sum \frac{1}{x_{line}} (\theta_{bsource} - \theta_{bsink}) \quad (3.10)$$

Dimana P_{gen} adalah daya terbangkit dan P_{load} adalah daya pada beban.

P_{line} adalah daya pada saluran yang tersambung antara bus sumber dan bus tujuan. θ_{source} dan θ_{sink} adalah sudut tegangan bus sumber dan bus tujuan, dan x_{line} sebagai reaktansi saluran.

Untuk inequality constraint dibuat efisiensi yang berbeda pada setiap tahap beban.

- Daya terbangkit bisa berubah sesuai dengan jenis pembangkit.

$$P_{\text{genmin}} < P_{\text{gen}} < P_{\text{genmax}} \quad (3.11)$$

- Beban bisa berubah sesuai dengan karakteristik beban.

$$P_{\text{loadmin}} < P_{\text{load}} < P_{\text{loadmax}} \quad (3.12)$$

- Biaya energi pelanggan bisa berubah sesuai dengan jenis pembangkit.

$$F_{\text{gencostmin}} < F_{\text{gencost}} < F_{\text{gencostmax}} \quad (3.13)$$

Dimana P_{genmin} dan P_{genmax} adalah daya terbangkit minimum dan daya terbangkit maksimum dari sebuah pembangkit dalam suatu kasus. Sedangkan P_{loadmin} dan P_{loadmax} adalah beban minimum dan beban maksimum dan $F_{\text{gencostmin}}$ dan $F_{\text{gencostmax}}$ adalah biaya energi pelanggan minimum dan biaya energi pelanggan maksimum.

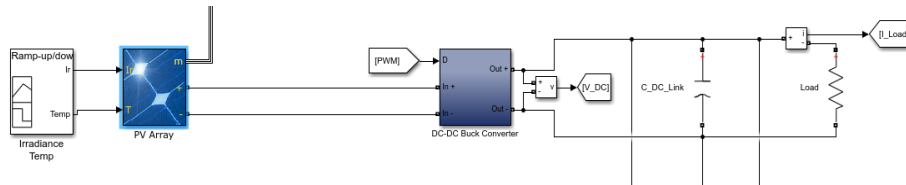
3.7 Pertimbangan Penyimpan Energi Listrik

Pemodelan yang akan dilakukan adalah dengan menggunakan MATLAB Simulink dan Microsoft Excel untuk menghitung kapasitas penyimpanan listrik, dengan menghitung langsung kapasitas photovoltaic dan rangkaian off-grid ke rumah dengan kapasitas tertentu. Pada bagian ini akan ditampilkan metode pemodelan mulai dari pemilihan tempat dan waktu pelaksanaan, spesifikasi komponen utama mulai dari beban hingga fotovoltaik yang tidak termasuk kabel dan tata letak ruangan serta parameter desain pabrikan masing-masing komponen utama.

Dalam pemilihan tempat dan waktu pemasangan, penulis mempertimbangkan faktor reduksi daya pada temperatur dibawah temperatur NOCT dan mempertimbangkan peta watt-peak sehingga lebih baik pemasangan PV ini pada daerah yang terdiri dari dataran rendah atau kondisi geografis yang mampu.

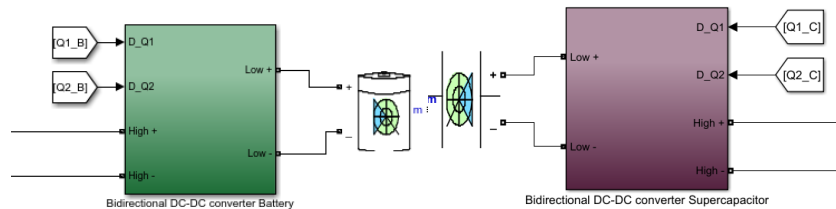
suhu panas seperti di sekitar pantai atau pulau-pulau yang belum diairi listrik yang juga bertujuan untuk meningkatkan rasio elektrifikasi.

Yang diperlukan untuk sizing storage adalah menambah beban DC jika ada, kemudian dibagi dengan efisiensi utilitas storage (dalam hal ini penulis mendefinisikan efisiensi utilitas adalah 0.9) dan dikalikan dengan hari otonomi, hari saat tidak ada input daya, baterai masih dapat menutupi kekurangan daya.



Gambar 3.6 Pemodelan PV untuk Simulasi Penyimpan Energi

Selanjutnya melakukan koreksi dibagi kedalaman pembuangan, kemudian dikalikan dengan nilai margin desain (dari normal pabrikan 1,15), dan melakukan koreksi suhu, tetapi karena suhu operasi di atas 25 ° C, jarang dilakukan koreksi suhu, kemudian setelah semuanya dikoreksi dengan% kapasitas baterai sebagai koreksi usia baterai. Dalam hal ini baterai yang digunakan adalah jenis baru sehingga kapasitasnya 100% = 1.

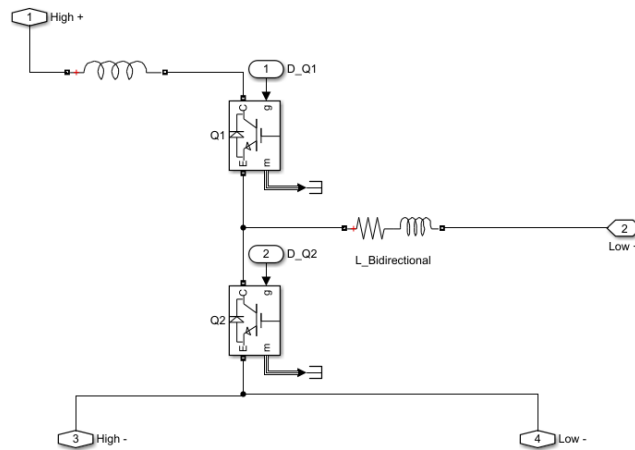


Gambar 3.7 Pemodelan Baterai dan Superkapasitor untuk Simulasi Penyimpan Energi

Untuk mengetahui efisiensi baterai, diperlukan data $V_{\text{discharge}}$ dan V_{charge} dari datasheet baterai, dan untuk energi adalah daya Watt dan waktu pemakaian dalam hitungan detik dan daya Watt dengan waktu pengisian dalam hitungan detik

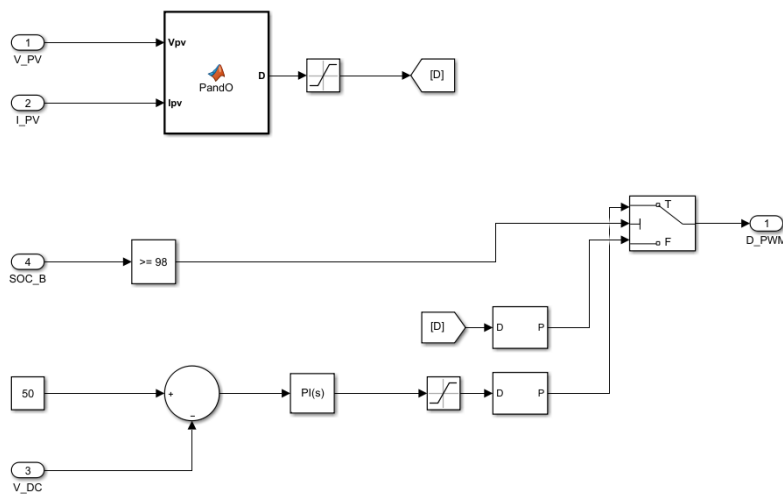
Perhitungan serupa dilakukan dengan superkapasitor melihat lembar data. Namun kekurangan dari superkapasitor adalah ketika dalam kondisi floating maka daya yang terbuang lebih besar dari pada baterai. Hal yang perlu diperhatikan adalah tegangan nominal dan kapasitas baterai.

Panel surya dapat dihubungkan secara seri, paralel, atau kombinasi seri dan paralel. Setiap panel mengeluarkan tegangan dan arus tertentu, dan tegangan total dan arus total yang dipasok oleh susunan surya tergantung pada bagaimana panel dihubungkan. Hal pertama yang harus dilakukan adalah memeriksa sistem PV ketika beberapa panel dihubungkan secara seri, dan kemudian, memeriksa sistem PV ketika beberapa panel dihubungkan secara paralel. Terakhir, periksa beberapa koneksi seri dan paralel.



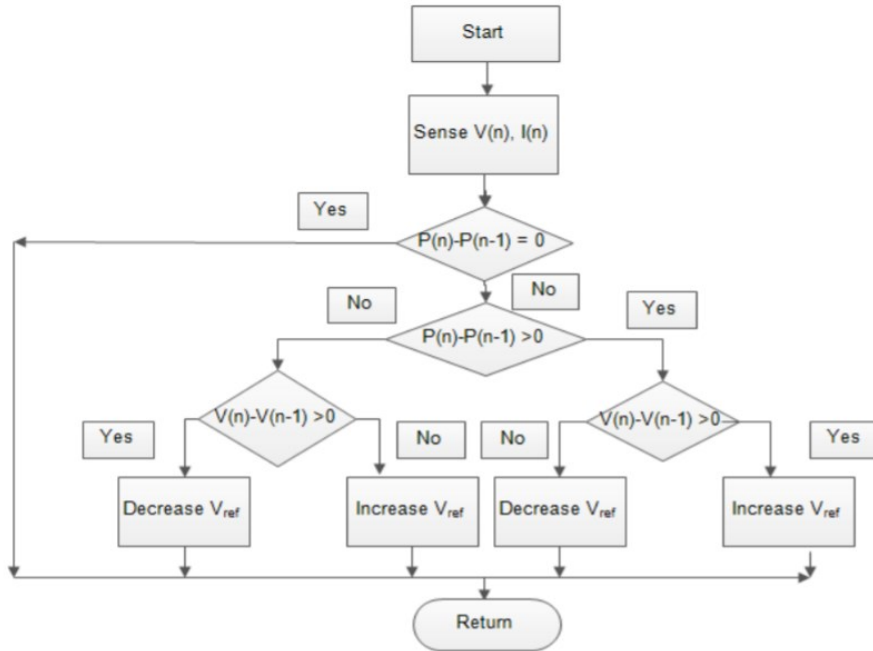
Gambar 3.8 Sistem Bidirectional Converter untuk Simulasi Penyimpan Energi

Pelacak Titik Daya Maksimum (MPPT) untuk sistem diberikan menggunakan Algoritma *Perturb and Observe (P&O)*. Konverter dua arah yang digunakan dalam sistem terdiri dari 2 IGBT dan membandingkan input tinggi dan rendah dan melampaui arus tinggi ke sisi lain.



Gambar 3.9 Sistem MPPT berbasis Perturb and Observe untuk Simulasi Penyimpan Energi

Berikut adalah flowchart untuk algoritma Perturb and Observe yang digunakan dalam MPPT dalam penelitian ini.



Gambar 3.10 Flowchart Algoritma Perturb and Observe untuk MPPT

3.8 Studi Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pemodelan yang akan dilakukan adalah dengan menggunakan MATLAB Simulink dan Microsoft Excel untuk menghitung efisiensi dari plant PLTA yang telah dimodelkan sesuai dengan data debit maksimum kapasitas PLTA ini sendiri, dengan memperhitungkan apabila PLTA ini dipasangkan *Load Frequency Control* berbasis kontrol PI yang tuningnya akan diberikan dari perhitungan metode *Ziegler-Nichols* dan juga perbandingan dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization*.

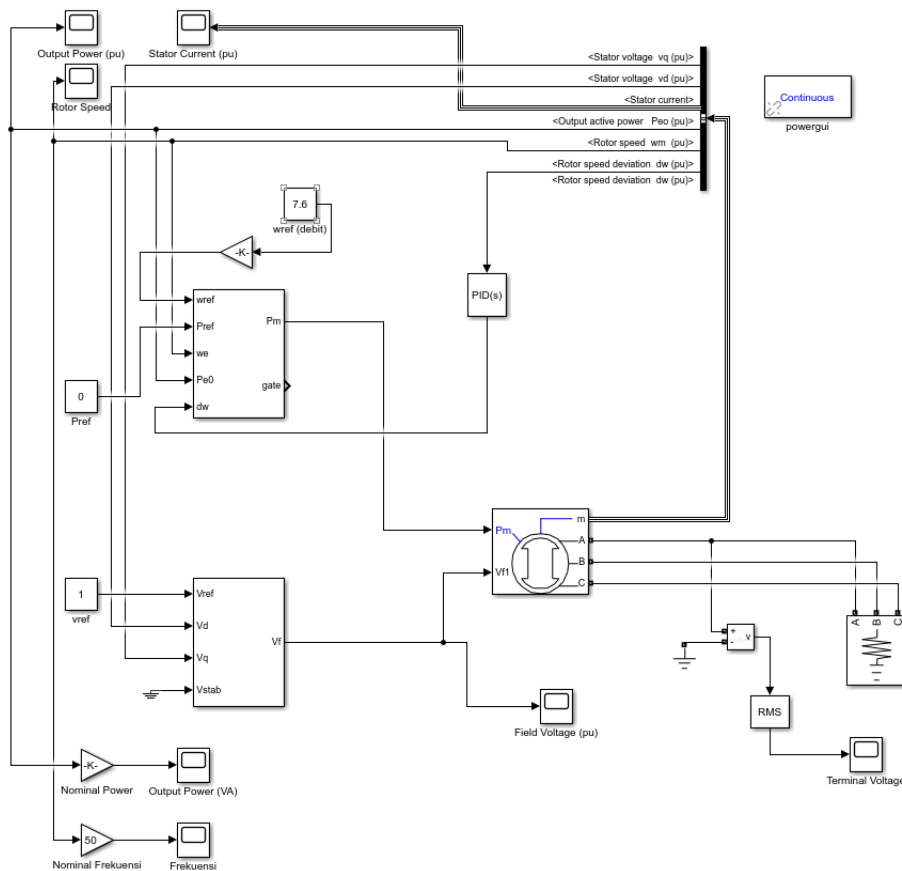
Dalam pemodelan sistem kontrol pembangkit PLTA terdapat beberapa parameter sistem kontrol PLTA. Debit air diperoleh dari pengambilan data pada unit PLTA Sengguruh di Krajan, Malang adalah dengan kapasitas maksimal untuk debit tertinggi pertahunnya (musim hujan) adalah debit air setiap penstock (Q) = $27,360 \text{ m}^3/\text{jam} = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ setiap penstock (2 unit generator dengan masing-masing ada 12 penstock) maka total debit adalah $182,4 \text{ m}^3/\text{s}$ dan tinggi jatuh (H) = 18,5 m.

Namun dalam pemodelan PLTA ini akan melakukan variasi debit air dengan kapasitas maksimal yang dapat dihasilkan adalah sesuai rumus daya sama dengan konstanta, dimana konstanta sendiri adalah debit dikali dengan massa jenis air dikali panjang penstock, dalam satuan HP, dimana apabila dikonversikan ke daya adalah sekitar 0,736 kW jadi nilai konstanta ini sekitar 9,813.

Turbin bergerak menghasilkan sebuah energi mekanik yang menjadi nilai input dari parameter generator induksi dari yang didapatkan adalah dengan kapasitas 20 MVA, secara hitungan apabila efisiensi turbin dianggap 1, maka daya maksimal yang dapat dihasilkan 33069,12 kW daya dibangkitkan.

Diketahui terdapat 2 unit generator beroperasi dengan setiap 1 penstock tidak beroperasi untuk spare. Namun direncanakan akan dilakukan perluasan konstruksi menjadi 8 unit (wacana parawisata) sehingga apabila dimodelkan peneliti mencoba memodelkan di MATLAB Simulink dengan 33 MW dikali 4 yaitu 132 MW dibulatkan kebawah menjadi 130 MW (diatas kapasitas maksimal Swing Generator dari simulasi IEEE 9-Bus yaitu 125 MW, maka bisa sebagai objek riset).

Dari simulasi maka didapatkan efisiensi sebenarnya dari pembangkit dengan mempertimbangkan friksi dan kavitasi pada penstock dan faktor-faktor lainnya untuk setiap debit maksimal yang masuk kedalam PLTA.



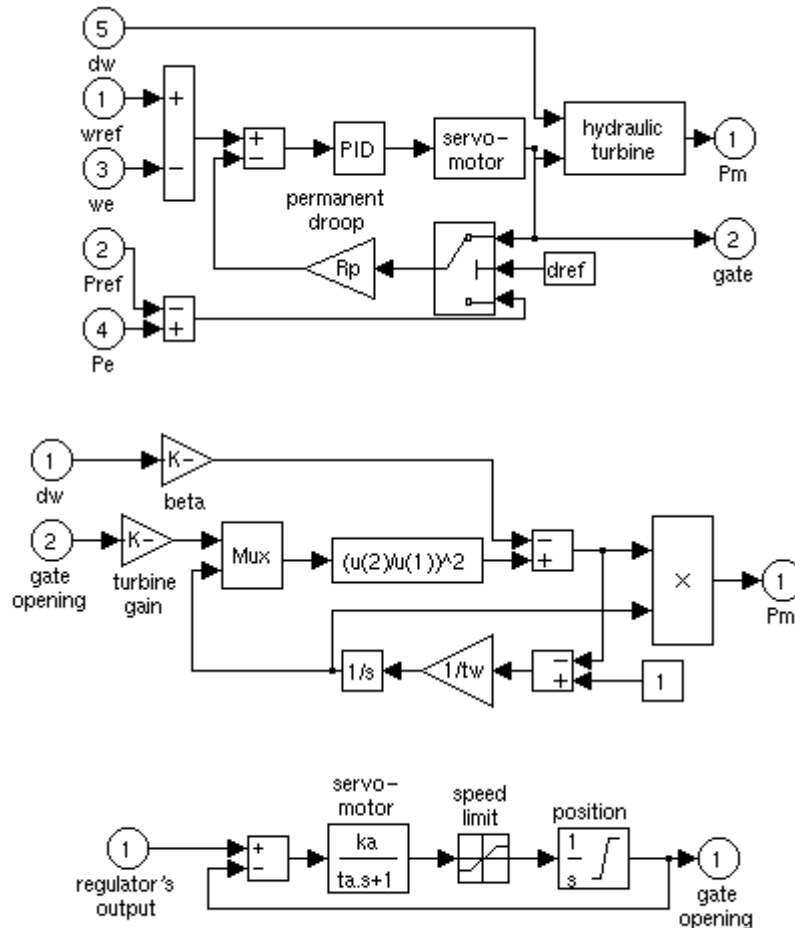
Gambar 3.11 Blok Diagram PLTA 130 MW MATLAB Simulink

Tabel 3.1 Parameter Plant PLTA tanpa LFC (sebagai Voltage Control DG)

Parameter	Keterangan	Nilai
Ka	Gain servo motor	10/3
Ta	Konstanta waktu servo motor (s)	0.07
gmin	Posisi minimum buka gate (pu)	0.01
gmax	Posisi maksimum buka gate (pu)	0.97518
vgmin	Kecepatan minimum operasi gate (pu/s)	-0.1
vgmax	Kecepatan maksimum operasi gate (pu/s)	0.1
Rp	Gain Permanent Droop	0.05
Kp	Konstanta Proporsional	1
Ki	Konstanta Integral	0
Kd	Konstanta Diferensial	0
Ts	Konstanta waktu LPF permanent droop (s)	0.01
beta	Koefisien damping deviasi kecepatan turbin	0
Tw	Waktu masuk air ke turbin (s)	2.67
Pm_initial	Daya mekanik awal (pu)	0.75

Pm initial dibuat oleh penulis 0,75 merepresentasikan 1 dari 4 set generator yang masuk sistem, untuk penentuan tuning kontrol LFC yang optimal.

Sistem transmisi yang digunakan adalah bus pembangkitan Tegangan menengah 3 fasa 20 kV yang di step-up ke 150 kV. Parameter yang digunakan penulis dalam parameter plant dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut.

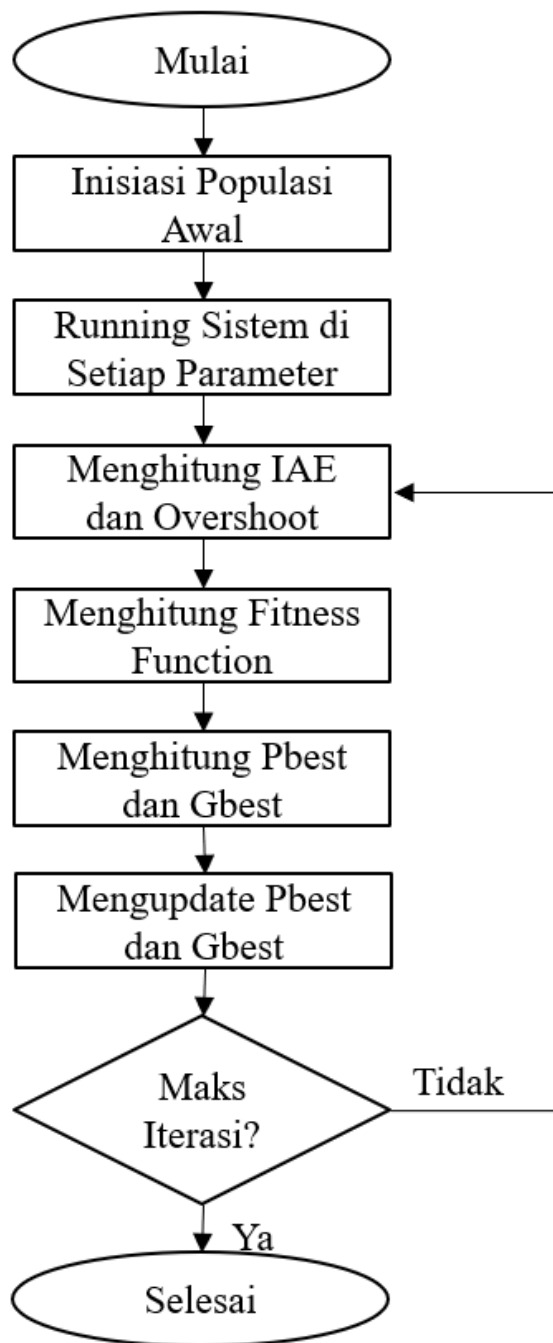


Gambar 3.12 Dasar Blok Diagram model PLTA yang dibuat di MATLAB Simulink

Dalam simulasi ini dilakukan terlebih dahulu simulasi dengan tanpa kontrol, atau ketika ketika generator beroperasi sebagai voltage control, dan bukan sebagai swing. Ini untuk menentukan nilai overshoot yang akan dimasukkan kedalam program. Setelah ada nilai overshoot maka akan dilakukan running simulasi MATLAB untuk penentuan K_p dan K_i dalam tuning LFC, dan dalam operasinya tingkat stabilitas frekuensi akan dievaluasi untuk mendapatkan metode kontrol paling optimal untuk LFC yang akan digunakan sistem sebagai Swing DG.

Dalam tuning kontrol PI untuk LFC, digunakan metode PSO dengan flowchart kontrol yang ada sebagai berikut.

1. Inisialisasi populasi awal
Inisialisai populasi awal, dimana setiap individu memiliki posisi dan kecepatan dan swarm pada PSO akan meninisialisasikan posisi dan kecepatan yang secara acak atau tak beraturan. Data PLTA yang digunakan adalah data debit yang telah diambil sebelumnya [10].
2. Evaluasi fitness fungsi
Tahap ini fitness fungsi, dimana dalam fungsi particle swarm optimization (PSO) mempunyai fungsi *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang digunakan untuk menata nilai PID.
3. Update posisi Pbest untuk tiap individu
Pada tahap ini PSO akan menentukan posisi dari setiap individu, dengan menentukan batasan-batasan yang diijinkan dari ruang pencarian selama iterasi maksimal belum tercapai.
4. Update posisi terbaik Gbest dari setiap populasi
Pada tahap ini, dimana posisi dan kecepatan yang terbaik dalam populasi, akan memperbarui hasil dari iterasi yang sudah dilakukan.
5. Maxmimal iterasi tercapai
Tahapan ini, dimana dalam iterasi maksilamal 50. Jika iterasi belum tercapai optimal, maka akan kembali pada step awal update posisi dan kecepatan untuk mengetahui posisi dan kecepatan yang optimal. Pencapaian dalam hal model pendekantan respon, dan berhentinya pencarian posisi dan kecepatan apabila nilai fungsi tidak berubah dengan jumlah maksilamal iterasi yang dilakukan.
6. Update posisi dan kecepatan
Pada tahap ini, apabila iterasi belum tercapai, maka akan menentukan posisi dan kecepatan yang terbaik. Dapat kita ketahui bahwasanya untuk sitem kinerja pembangkit listrik tenaga air diperlukan debit air yang dapat memutar turbin dan generator, putaran dari generator inilah yang dapat menghasilkan suatu energi listrik.



Gambar 3.13 Flowchart Sistem Kontrol PSO untuk tuning kontrol PI pada LFC

Untuk mengetahui kemampuan dan keberhasilan dari suatu sistem yang telah dirancang maka dilakukanlah simulasi yang telah dibuat. Pengujian sistem meliputi pengujian parameter controller. Ada beberapa pengujian sistem yang dilakukan yaitu:

1. Pengujian sistem penentuan parameter dengan PSO
2. Pengujian sistem untuk parameter dengan Ziegler-Nichols.
3. Pengujian sistem untuk parameter dengan PSO
4. Perbandingan stabilitas frekuensi untuk penentuan tuning LFC terbaik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan dengan mencoba terhadap Dummy IEEE 9-Bus terlebih dahulu untuk rugi-rugi daya aktif dan daya reaktif. Setelah itu mencoba simulasi dengan sistem pembangkit energi terbarukan dengan memperhitungkan terlebih dahulu pengukuran (*sizing*) dan harga investasi awal untuk mendapatkan efisiensi dan harga total transaksi energi dari setiap pelanggan. Dalam hal ini didefinisikan pelanggan bisa bermakna sebagai penjual dan atau sekaligus pembeli daya listrik.

4.1 Pelacakan Rugi-rugi Daya Aktif dengan Power Flow Tracing terhadap Dummy IEEE 9-Bus (*Dummy IEEE 9-Bus P-Loss Tracing Testing*)

Berikut hasil yang didapatkan untuk pelacakan rugi-rugi daya aktif untuk Dummy IEEE 9-Bus dengan menggunakan Power Flow Tracing di Tabel 4.2. Untuk Single Line Diagram dapat dilihat di Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Dummy IEEE 9-Bus P-Losses Tracing

Source Bus	Load Bus	Losses in MW
1	4	0.003
2	7	0.016
3	9	0.004
1 -> 4	5	0.252
1 -> 4	6	0,133
2 -> 7	5	2.418
3 -> 9	6	1.403
2 -> 7	8	0.449
3 -> 9	8	0.080

Setelah mendapatkan total rugi-rugi maka bisa dihitung rugi-rugi per beban dari tiap-tiap generator.

Untuk rugi-rugi di Bus-5, terdapat kontribusi dari generator di Bus-1 dan Bus-2 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

$$P(1 \text{ to } 4) + P(4 \text{ to } 5) = 0.003 + 0.252 = 0.255 \text{ MW dari Gen-Bus-1}$$

$$P(2 \text{ to } 7) + P(7 \text{ to } 5) = 0.016 + 2.418 = 2.434 \text{ MW dari Gen-Bus-2}$$

Untuk rugi-rugi di Bus-6, terdapat kontribusi dari generator di Bus-1 dan Bus-3 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

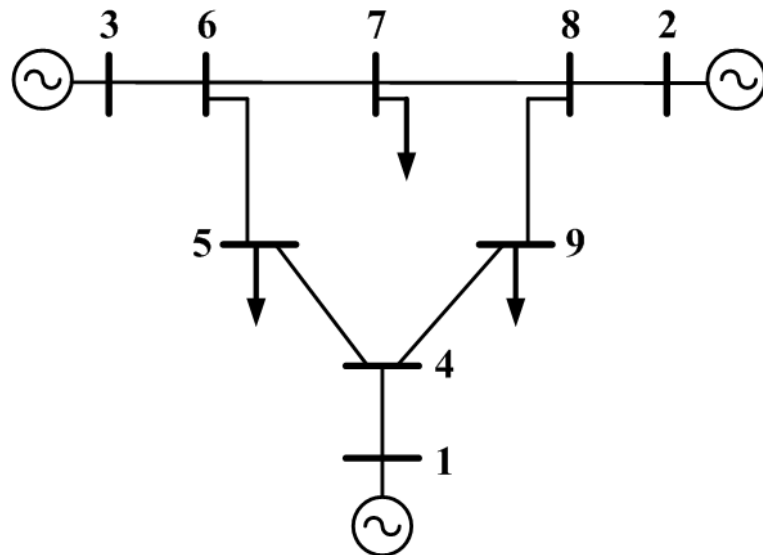
$$P(1 \text{ to } 4) + P(4 \text{ to } 6) = 0.003 + 0.133 = 0.136 \text{ MW dari Gen-Bus-1}$$

$$P(3 \text{ to } 9) + P(9 \text{ to } 6) = 0.004 + 1.403 = 1.407 \text{ MW dari Gen-Bus-3}$$

Untuk rugi-rugi di Bus-8, terdapat kontribusi dari generator di Bus-2 dan Bus-3 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

$$P(2 \text{ to } 7) + P(7 \text{ to } 8) = 0.016 + 0.449 = 0.465 \text{ MW dari Gen-Bus-1}$$

$$P(3 \text{ to } 9) + P(9 \text{ to } 8) = 0.004 + 0.080 = 0.084 \text{ MW dari Gen-Bus-3}$$



Gambar 4.1 Single Line Diagram *Dummy IEEE 9-Bus System*

4.2 Pelacakan Rugi-rugi Daya Reaktif dengan Power Flow Tracing terhadap Dummy IEEE 9-Bus (*Dummy IEEE 9-Bus Q-Loss Tracing Testing*)

Berikut hasil yang didapatkan untuk pelacakan rugi-rugi daya reaktif untuk Dummy IEEE 9-Bus dengan menggunakan Power Flow Tracing di Tabel 4.2. Untuk pelacakan rugi-rugi daya reaktif ini diperlukan imaginary bus pada bus selain Gen-Bus (1 s/d 3). Urutan bus imaginary bus mengikuti urutan bus non Gen-Bus (4 s/d 9). Karena daya reaktif adalah daya yang berputar didalam sistem, maka beberapa imaginary bus yang memiliki beban reaktif juga bisa menjadi supply daya reaktif untuk menjaga kestabilan sistem, dalam hal ini dinyatakan dalam bentuk Q yang bernilai negatif.

Tabel 4.2 Dummy IEEE 9-Bus Q-Losses Tracing

Source Bus	Load Bus	Contribution Bus	Losses in MVAR
1	4	1	1.120
1	4	13	0.651
1	4	14	1.003
7	2	2	7.380
7	2	12	8.486
9	3	12	1.774
9	3	13	2.333
10	5	1	-3.200
10	5	10	-4.047
10	5	15	-0.671
11	6	11	-7.853
12	7	2	-1.298
12	7	12	-8.252
13	9	12	-6.772
13	9	13	-8.907
14	9	12	-4.594
14	9	13	-6.042
15	8	15	-5.871
1	10	1	-3.496
1	10	10	-4.422
7	11	11	-7.853
9	12	12	-9.550
4	13	13	-15.680
4	14	14	-10.637
5	15	15	-5.871

Maka dengan cara yang sama dengan pelacakan rugi-rugi daya aktif, maka didapatkan hasil kontribusi daya reaktif dari setiap Gen-Bus terhadap beban.

Untuk rugi-rugi di Bus-5, terdapat kontribusi dari generator di Bus-1 dan Bus-2 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

$$Q = -15.837 \text{ MVAR dari Gen-Bus-1 atau } 15.837 \text{ MVAR ke Gen-Bus-1}$$

$$Q = -19.100 \text{ MVAR dari Gen-Bus-2 atau } 19.100 \text{ MVAR ke Gen-Bus-2}$$

Untuk rugi-rugi di Bus-6, terdapat kontribusi dari generator di Bus-1 dan Bus-3 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

$$Q = -15.707 \text{ MVAR dari Gen-Bus-1 atau } 15.707 \text{ MVAR ke Gen-Bus-1}$$

$$Q = -31.360 \text{ MVAR dari Gen-Bus-3 atau } 31.360 \text{ MVAR ke Gen-Bus-3}$$

Untuk rugi-rugi di Bus-8, terdapat kontribusi dari generator di Bus-2 dan Bus-3 dengan total rugi-rugi sebagai berikut

$$Q = -11.742 \text{ MVAR dari Gen-Bus-2 atau } 11.742 \text{ MVAR ke Gen-Bus-2}$$

$$Q = -21.273 \text{ MVAR dari Gen-Bus-3 atau } 21.273 \text{ MVAR ke Gen-Bus-3}$$

4.3 Studi Kasus Sistem Energi Terbarukan *On-Grid* dan *Off-Grid*

Ada 3 studi kasus yang akan digunakan dalam simulasi ini. Kasus 1 yang telah disimulasikan pada sub-bab sebelumnya, adalah simulasi menggunakan generator built-in dari sistem IEEE 9-Bus. Ini bertujuan untuk menentukan kontribusi daya optimal yang dihasilkan dan pelacakan kerugian untuk sistem IEEE 9-Bus yang tidak dimodifikasi di lokasi yang sama. Kasus 2 adalah dengan menggunakan simulasi *off-grid*, seluruh pembangkit energi terbarukan yang tersebar di semua bus dengan memperhatikan kebutuhan beban sehingga simulasi berjalan pada daya yang dihasilkan sama dengan daya pada beban plus rugi-rugi. Kasus 3 adalah menggunakan simulasi *on-grid*, kombinasi bus swing dan generator energi terbarukan yang tersebar di semua bus dengan tujuan untuk mengetahui kontribusi dan kerugian daya dari bus mana yang menanggung beban paling besar pada sistem. Simulasi diberikan pada semua bus yang saling berkontribusi dalam sistem bus. Jadi, tidak ada bus yang dibiarkan kosong.

Tabel 4.3 IEEE 9-Bus Off-Grid Simulation Parameter

No. Bus	Load and Generated Power Per Bus <i>Bus Type</i>	Load and Generated Power Per Bus			
		<i>-P</i> (MW)	<i>-Q</i> (MVAR)	<i>+P</i> (MW)	<i>+Q</i> (MVAR)
1	Fixed Generator	-	-	56	19
2	Fixed Generator	-	-	56	19
3	Fixed Generator	-	-	56	19
4	Fixed Generator	-	-	56	19
5	Generator and Load	125,84	50,327	56	19
6	Generator and Load	87,705	29,235	56	19
7	Fixed Generator	-	-	56	19
8	Generator and Load	96,879	33,894	56	19
9	Fixed Generator	-	-	56	19

Dari sistem IEEE 9-Bus yang belum dimodifikasi, daya aktif yang dihasilkan sebesar $247,5 + 163,2 + 85 = 495,7$ MW, dan daya reaktif yang dihasilkan sebesar $101,142 + 66,428 = 167,57$ MVAR. Daya aktif total dan daya reaktif didistribusikan secara seragam. Jadi masing-masing bus memiliki $55,08$ MW \sim 56 MW dan $18,62$ MVAR \sim 19 MVAR.

Berikut hasil yang didapatkan untuk hasil simulasi untuk simulasi rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif.

Tabel 4.4 IEEE 9-Bus Off-Grid P-Losses Tracking Simulation

Source Bus	Load Bus	Losses in MW
1	4	0.003
2	7	0.002
3	9	0.002
1 -> 4	5	0.356
1 -> 4	6	0.519
2 -> 7	5	0.398
3 -> 9	6	0.693
2 -> 7	8	0.543
3 -> 9	8	0.625

Total rugi daya aktif untuk kasus ini adalah 3.1489 MW. Hasil ini memiliki efisiensi yang lebih baik dari kasus 1 karena kerugian yang lebih sedikit.

Dengan metode yang sama untuk rugi daya reaktif seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.5 IEEE 9-Bus Off-Grid Q-Losses Tracking Simulation

Source Bus	Load Bus	Contribution Bus	Losses in MVAR
1	4	1	2.131
1	4	13	0.573
1	4	14	0.482
7	2	2	2.289
9	3	3	2.192
10	5	5	-4.767
10	5	15	-0.491
11	6	6	-4.192
11	6	11	-2.383
12	7	2	-7.443
12	7	11	-2.180
12	7	12	-4.831
13	9	3	-6.145
13	9	12	-3.256
13	9	13	-5.037
13	9	14	-2.129
14	9	3	-2.934
14	9	12	-1.555
14	9	13	-2.405
14	9	14	-1.016
15	8	8	-3.533
15	8	15	-1.698
1	10	10	-7.338
7	11	11	-6.575
9	12	12	-14.454
4	13	13	-16.568
4	14	14	-7.910
5	15	15	-5.232

Total kerugian reaktif untuk kasus ini adalah 108.361 MVAR. Sedangkan kerugian reaktif meningkat karena lalu lintas listrik yang tinggi dalam sistem karena sumber energi terbarukan yang terdistribusi secara merata tetapi masih dalam jangkauan yang terbatas (karena tidak ada jaringan yang terhubung).

Parameter pengukuran dalam penentuan sistem terbaik adalah rugi daya aktif terendah. Karena kehilangan daya aktif mempengaruhi frekuensi sistem. Jika frekuensi berfluktuasi, besar kemungkinan sistem akan kehilangan stabilitas.

Tabel 4.6 IEEE 9-Bus On-Grid Simulation Parameter

No. Bus	Bus Type	Load and Generated Power Per Bus			
		-P (MW)	-Q (MVAR)	+P (MW)	+Q (MVAR)
1	Swing Generator	-	-	56	19
2	Swing Generator	-	-	56	19
3	Swing Generator	-	-	56	19
4	Fixed Generator	-	-	56	19
5	Generator and Load	125,84	50,327	56	19
6	Generator and Load	87,705	29,235	56	19
7	Fixed Generator	-	-	56	19
8	Generator and Load	96,879	33,894	56	19
9	Fixed Generator	-	-	56	19

Perbedaan antara kasus 2 dan kasus 3 adalah bahwa generator asli (mewakili generator yang digunakan LFC konvensional) dari bus generator diberikan sebagai bus ayun. Untuk kasus ini, generator asli: bus 1, bus 2, bus 3 dialihkan sebagai bus swing. Hal ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kontribusi rugi-rugi daya dari setiap jaringan transmisi dari dan kepada masing-masing generator.

Berikut hasil yang didapatkan untuk hasil simulasi untuk simulasi rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif.

Tabel 4.7 IEEE 9-Bus On-Grid P-Losses Tracking Simulation

Source Bus	Load Bus	Losses in MW
1	4	0.001
2	7	0.000
3	9	0.001
1 -> 4	5	0.220
1 -> 4	6	0.104
2 -> 7	5	0.223
3 -> 9	6	0.094
2 -> 7	8	0.046
3 -> 9	8	0.056

Total rugi daya aktif untuk kasus ini adalah 0,7463 MW. Hasil ini paling efisien karena jaringan terhubung, memberikan kontribusi lebih dalam efisiensi sistem.

Dengan metode yang sama untuk rugi daya reaktif seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.8 IEEE 9-Bus On-Grid Q-Losses Tracking Simulation

Source Bus	Load Bus	Contribution Bus	Losses in MVAR
1	4	1	0.343
1	4	13	0.191
1	4	14	0.170
7	2	2	0.408
9	3	3	0.611
10	5	1	-0.409
10	5	5	-1.844
10	5	10	-5.790
11	6	2	-0.714
11	6	11	-6.635
11	6	12	-0.429
12	7	2	-9.305
12	7	12	-5.588
13	9	3	-7.630
13	9	12	-4.663
13	9	13	-4.650
13	9	14	-0.930
14	9	3	-4.405
14	9	12	-2.692
14	9	13	-2.684
14	9	14	-0.537
15	8	15	-7.329
1	10	1	-0.530
1	10	10	-7.513
7	11	2	-0.714
7	11	11	-6.635
7	11	12	-0.429
9	12	12	-14.893
4	13	13	-17.873
4	14	14	-10.318
5	15	15	-7.329

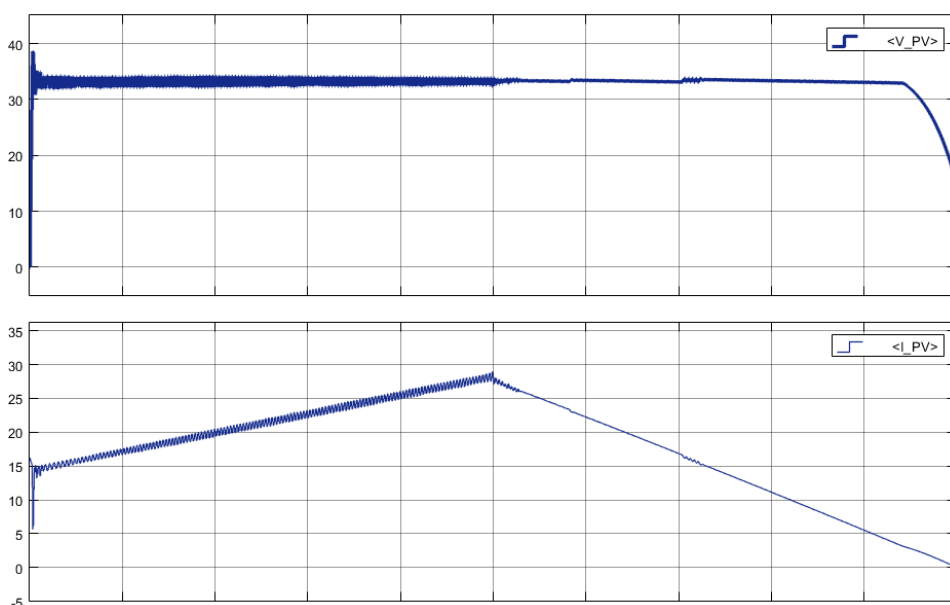
Total kerugian reaktif untuk kasus ini adalah 130.7459 MVAR. Kerugian reaktif pada puncaknya karena sumber energi terbarukan yang didistribusikan secara seragam dan lalu lintas jaringan (karena terhubung ke jaringan).

Dari hasil penelitian diperoleh bahwa sistem kombinasi sistem energi terbarukan memberikan hasil yang lebih baik dalam hal rugi daya aktif sistem. Generator yang disalurkan energi terbarukan pada sistem gabungan memberikan kontribusi untuk menyerap rugi daya aktif, tetapi memberikan kontribusi yang lebih kecil terhadap rugi daya reaktif. Pseudo-bus memiliki kontribusi tertinggi selama sistem energi terbarukan saja dan sistem gabungan karena rugi daya reaktif yang diserap ke dalam bus, yang berarti berdampak pada stabilitas tegangan pada sistem. Dengan cara lain, luas penampang kabel harus lebih besar di bus tertentu karena ketidakseimbangan rugi daya reaktif.

Kesimpulan sementara untuk analisa rugi-rugi daya aktif dan reaktif jaringan perlu dipertimbangkan dalam perhitungan penentuan harga setiap kWh per unit satuan pembangkit listrik energi terbarukan.

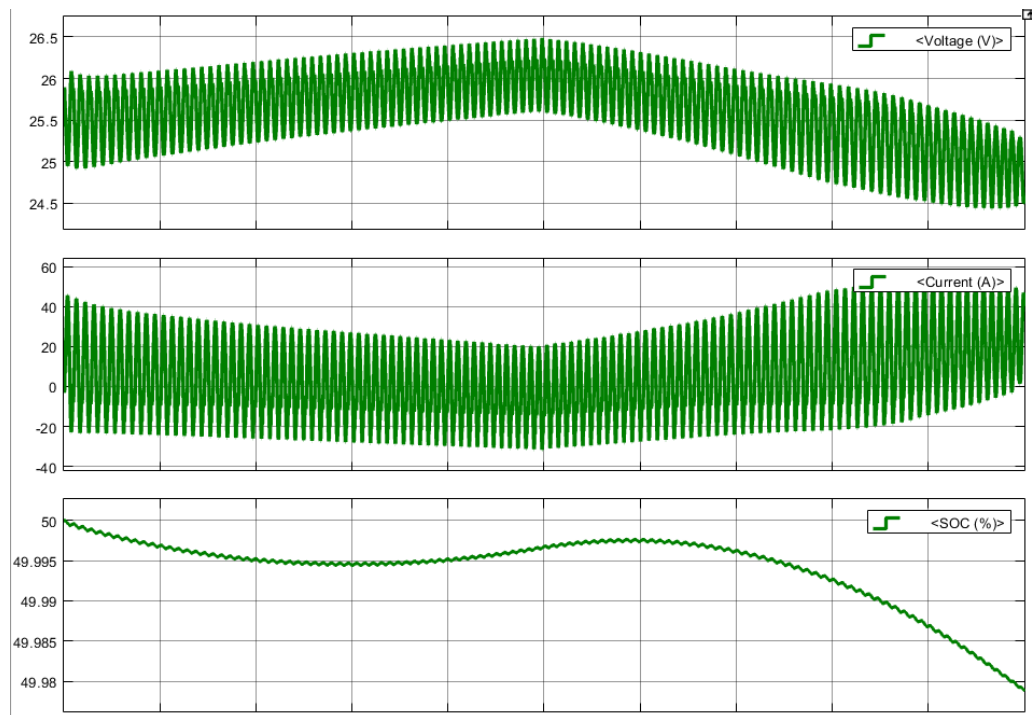
4.4 Simulasi Sistem Pembangkit Energi Terbarukan Photovoltaic Dengan Menggunakan Penyimpan Energi Dalam Skenario *Renewable Energy Off-Grid*

Sub-bab ini bertujuan untuk memberikan perbandingan sistem penyimpanan salah satu sumber energi terbarukan. Sistem penyimpanan yang akan dibandingkan adalah sistem PV-Baterai dan PV-Baterai-Superkapasitor sebagai representatif sistem energi terbarukan *off-grid* untuk pertimbangan penggunaan penyimpan energi listrik paling optimal dan ekonomis. Perbandingan akan dilakukan menggunakan semua peralatan yang sama untuk mendapatkan perbandingan yang optimal. Aspek yang akan diteliti adalah efisiensi daya, tegangan dan stabilitas daya pada sistem. Komponen yang digunakan dalam simulasi diberi nilai dan komponen tetap, memberikan pendekatan terbaik dalam perbandingan aspek.



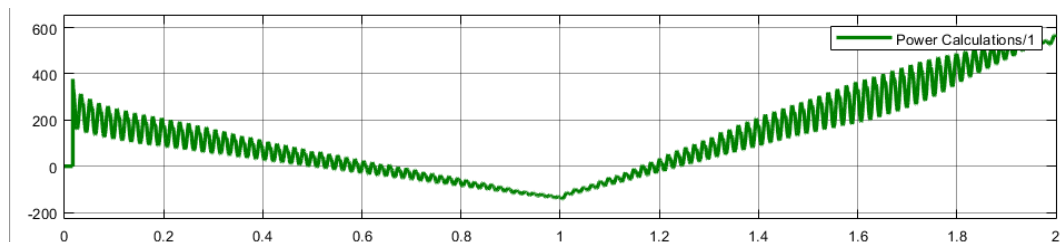
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan Keluaran PV

Karakteristik modul PV adalah sama untuk semua simulasi karena inputnya sama untuk keadaan yang berbeda. Hasilnya diketahui stabil dalam hal tegangan, tetapi ketika iradiasi mencapai 100 dan menurun secara konstan, tegangan turun secara signifikan (status cut-off tegangan modul PV). Namun arus memiliki karakteristik yang hampir sama dengan masukan iradiasi.



Gambar 4.3 Hasil Simulasi Arus, Tegangan dan SOC Baterai Skenario Baterai-PV

Baterai bertindak sebagai kompensator daya untuk beban karena daya untuk beban diberikan dari modul PV dan baterai. Ketika iradiasi cukup tinggi, menghasilkan daya di atas daya beban, daya yang dihasilkan akan mengikuti level beban, hal ini sama dengan teori PV bahwa daya yang dihasilkan akan mengikuti daya beban jika daya yang dihasilkan lebih tinggi dari beban. Jadi baterai akan mendukung sistem dengan menyediakan kebutuhan daya untuk beban. Daya dari PV ke beban melalui penyimpanan baterai hampir sama dengan daya dari PV langsung ke beban.



Gambar 4.4 Hasil Simulasi Daya Baterai Skenario Baterai-PV

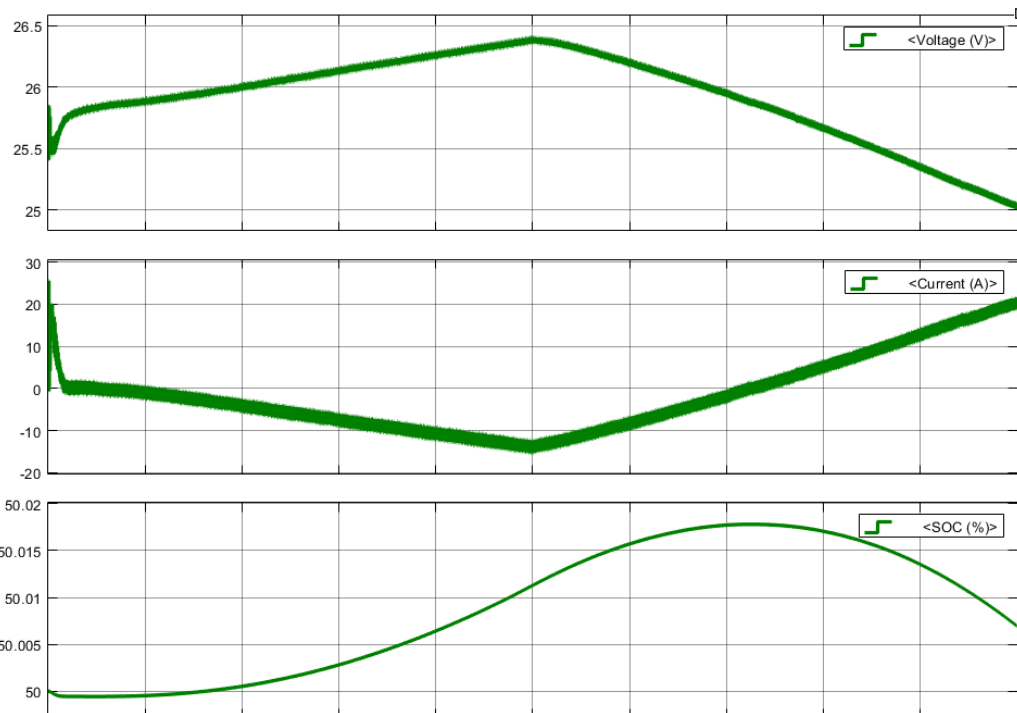
Daya yang disediakan oleh baterai akan mengikuti beban, karena nilai daya yang menghasilkan radiasi melebihi nilai daya beban, modul PV akan menghasilkan jumlah daya rendah yang stabil, sehingga baterai akan memberikan

karakteristik yang sama, jumlah daya yang stabil. Namun, jika nilai daya pembangkit iradiasi berada di bawah nilai daya beban, modul PV akan menghasilkan daya yang tidak stabil mengikuti nilai daya beban. Baterai akan bertindak sebagai kompensator sehingga beban akan tetap bernilai konstan.

Kemudian berikut adalah hasil simulasi menggunakan skenario *hybrid storage* baterai dan superkapasitor. Fase 1 adalah ketika iradiansi naik ke puncak, sedangkan fase 2 adalah ketika iradiansi turun menuju 0.

Baterai tetap dalam kondisi stabil, mengikuti kondisi awal untuk fase 1 dimana PV menghasilkan daya, baterai sedang diisi karena kapasitas totalnya lebih tinggi dari nilai daya yang menghasilkan radiasi. Untuk superkapasitor, dengan nilai awal 100%, superkapasitor memberikan daya selama waktu respons baterai, setelah waktu respons baterai, superkapasitor mulai mendapatkan daya dari PV.

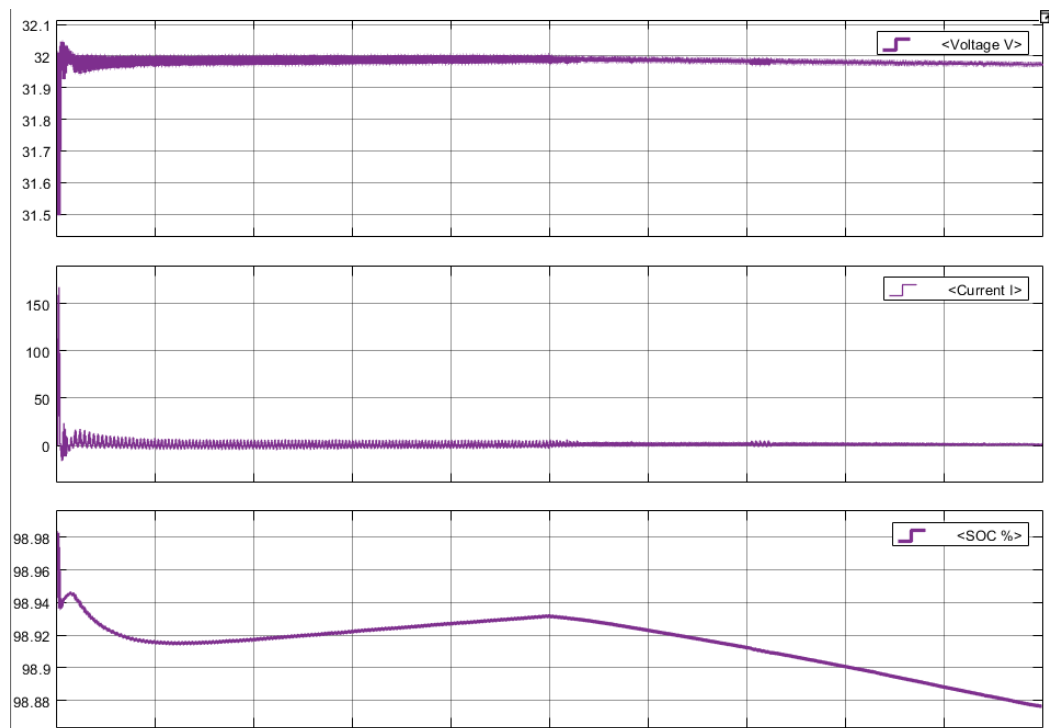
Fase 2, baterai masih memperoleh dari PV sampai nilai daya yang menghasilkan radiasi melebihi di bawah nilai daya beban. Setelah itu, baterai akan mulai memberikan daya ke sistem. Superkapasitor, sebaliknya, akan memberikan penurunan radiasi secara langsung.



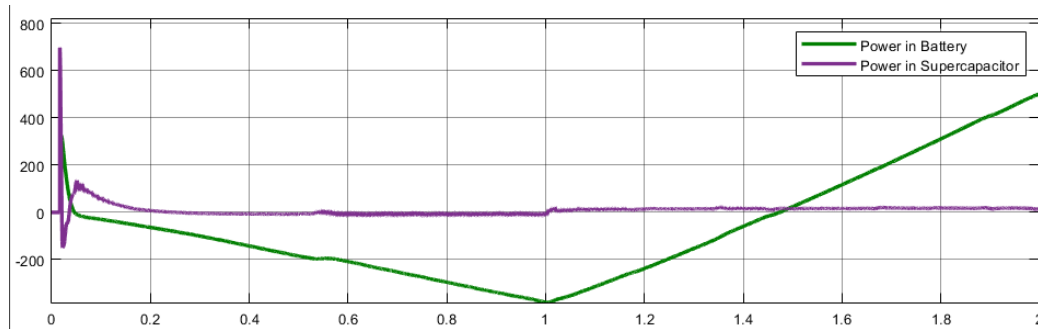
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Baterai Skenario *Hybrid Storage-PV*

Inilah perbandingan antara karakteristik penyimpanan hanya baterai dengan karakteristik penyimpanan hibrida. Baterai juga memberikan jumlah daya yang dibutuhkan beban, tetapi lebih stabil karena efek osilasi yang dihilangkan dalam superkapasitor. Superkapasitor masih bersifat kapasitor, menjadi filter efek osilasi pada baterai dan mengkompensasi kebutuhan daya untuk beban dalam waktu respon baterai.

Daya penyimpanan yang dihasilkan terutama disediakan oleh baterai dalam sistem hybrid. Superkapasitor memberi sistem sedikit tenaga. Superkapasitor memberikan tegangan dan kontribusi daya yang lebih stabil dalam sistem dengan menyerap semua efek osilasi. Daya dari PV ke dalam beban melalui penyimpanan, bagaimanapun, kurang dari sistem yang hanya menggunakan baterai karena pemakaian sendiri yang tinggi oleh karakteristik superkapasitor.



Gambar 4.6 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Superkapasitor Skenario *Hybrid Storage-PV*



Gambar 4.7 Hasil Simulasi Perbandingan Daya Baterai dan Superkapasitor Skenario *Hybrid Storage-PV*

Dari penelitian sebelumnya diperoleh bahwa superkapasitor memiliki kemampuan untuk mengambil dan menghemat energi dari sistem. Dari penelitian ini, kestabilan daya dan tegangan diukur dengan tegangan awal undershoot dan power overshoot tertinggi. Hal ini mengingat start pada baterai-PV beresilasi $\pm 0,601$ V dari tegangan nominal baterai dan daya overshoot pada 372,773 W. Start pada sistem penyimpanan hybrid adalah undershoot -0,507 V dari tegangan penyimpanan nominal tanpa osilasi dan daya overshoot pada 696,936 W. Efisiensi daya diukur dengan berapa banyak daya yang diisi dan dikosongkan ke baterai (baterai memiliki efisiensi daya tertinggi karena tingkat self-discharge rendah). Daya yang lebih rendah masuk ke superkapasitor, berarti lebih banyak daya ke baterai. Ini mengingat daya yang terisi di PV-baterai sepenuhnya masuk ke dalam baterai. Daya yang dibebankan pada radiasi maksimum (1000 W/m^2) di PV-baterai-superkapasitor dibagi, 383,591 W ke dalam baterai, dan rata-rata 19,619 W ke dalam superkapasitor. Artinya, untuk setiap 100% daya yang disimpan, daya ke baterai dikurangi 19,619 W. Semakin tinggi masukan energi, semakin tinggi efisiensi untuk sistem hibrida.

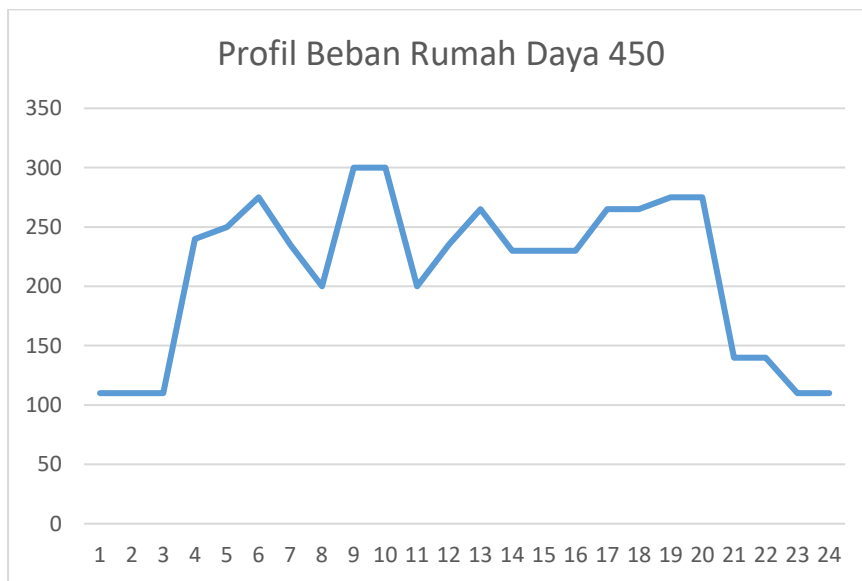
Kesimpulan sementara, dari hasil penelitian didapatkan karakteristik bahwa sistem hybrid memberikan hasil yang lebih baik pada tegangan dan stabilitas daya sistem. Keunggulan dari sistem penyimpanan hybrid adalah superkapasitor pada sistem penyimpanan hybrid memberikan kontribusi untuk menyerap efek osilasi, tetapi memberikan kontribusi yang lebih sedikit untuk distribusi daya, kecuali pada waktu respon baterai, superkapasitor memberikan daya untuk sistem. Setelah baterai masuk ke dalam sistem, baterai akan menyumbangkan daya sebagian besar untuk sistem karena karakteristik efisiensinya yang lebih tinggi.

Namun, terdapat juga kekurangan pada sistem penyimpanan hybrid yaitu untuk setiap daya yang dibebankan ke dalam penyimpanan, superkapasitor selalu menyimpan nilai tetap rata-rata sebesar 19,619 W dan pada penyinaran maksimum yang diuji, efisiensi untuk sistem hibrida berada pada 95,134%. Input energi yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih tinggi untuk sistem penyimpanan hybrid.

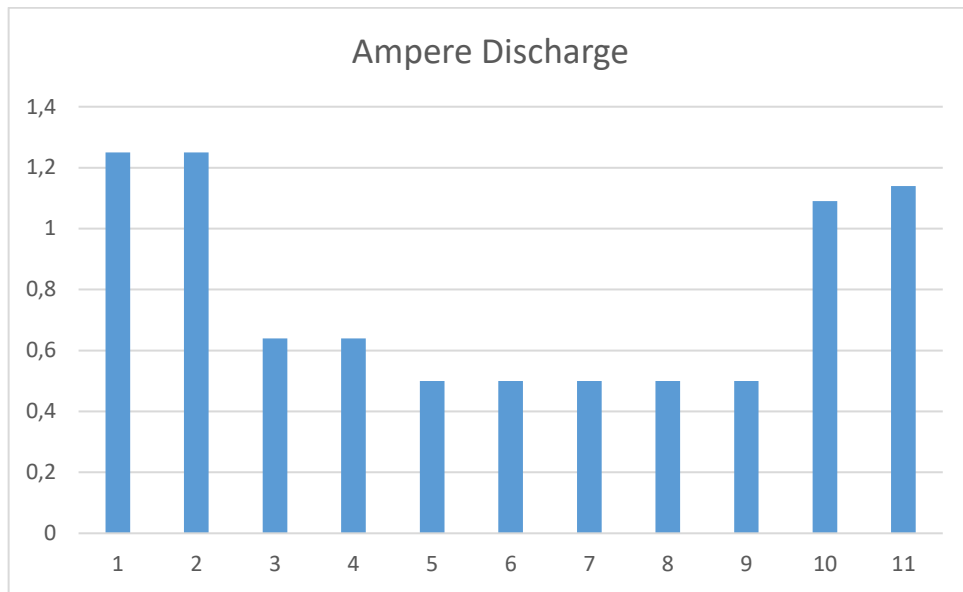
4.5 Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*Photovoltaic Installation Cost and Sizing*)

Sub bab ini akan membahas hasil dari pemodelan Sistem Standalone PV dengan beberapa tambahan komponen yang dibutuhkan seperti pengaman dan kabel, dan ada beberapa kondisi yang diberlakukan terhadap sistem yang telah dimodelkan. Kondisi pertama yaitu melihat BEP ketika baterai sebagai penyimpanan utama, dan kondisi kedua yaitu melihat BEP ketika hybrid baterai dan superkapasitor sebagai penyimpanan utama. Kemudian dibandingkan yang lebih ekonomis mempertimbangkan kualitas daya output.

Berikut adalah proyeksi beban dari data yang telah dihimpun untuk sebuah rumah 450 VA.



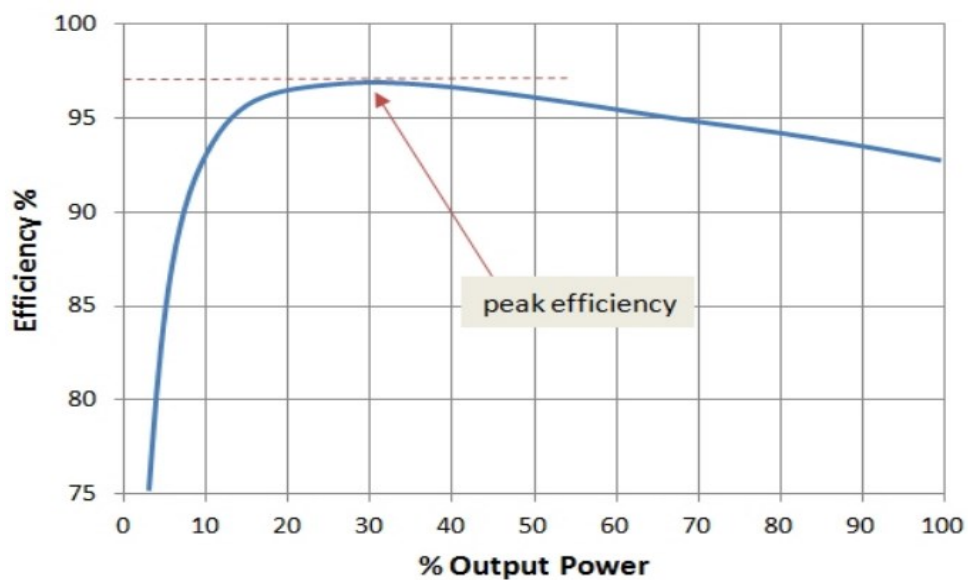
Gambar 4.8 Proyeksi Beban Rumah 450 VA



Gambar 4.9 Grafik Ampere Discharge 19.00 hingga 05.00 dari Rumah 450 VA

Maka dengan spesifikasi yang ada dalam lampiran, dapat disimpulkan bahwa sizing dapat dilakukan bertahap.

Dari penentuan profil beban didapatkan. Beban per jam minimum adalah 110W dan beban per jam maksimum adalah 300W. Adapun referensi yang menunjukkan kurva efisiensi dari inverter terhadap beban yang ditanggung, dalam hal ini yang perlu diperhatikan agar beban tetap terjaga di efisiensi yang tinggi.



Gambar 4.10 Grafik Efisiensi Inverter yang Digunakan

Melihat dari grafik dan datasheet inverter didapatkan 30% sebagai beban minimal yang memiliki efisiensi 0,95. Maka didapatkan kapasitas minimum inverter yang dibutuhkan dan efisiensi minimum dari inverter, dilakukan juga untuk beban maksimum sehingga didapatkan efisiensi maksimum dari inverter. Lakukan rata-rata sehingga mendapatkan pendekatan efisiensi inverter, dalam spreadsheet penulis didapatkan efisiensi inverter adalah 0,90818 dengan kapasitas inverter 500VA.

Setelah mendapatkan daya perhari setelah dikoreksi dengan efisiensi inverter, maka Langkah selanjutnya adalah melakukan sizing untuk storage. Yang dibutuhkan untuk sizing storage yaitu menambah dengan beban DC jika ada, kemudian dibagi dengan efisiensi utilitas dari storage (dalam hal ini penulis mendefinisikan efisiensi utilitas adalah 0,9) dan dikalikan dengan days of autonomy, hari dimana Ketika tidak ada daya masuk, baterai masih bisa menutup kekurangan daya.

Mengikuti sizing penyimpanan energi yang ada, Berikutnya melakukan koreksi dengan dibagi dengan depth of discharge, kemudian dikali nilai desain margin (dari pabrikan normalnya 1,15), dan melakukan koreksi suhu, namun karena suhu operasi diatas 25, maka jarang dilakukan koreksi suhu, kemudian setelah semua selesai dikoreksi dengan %kapasitas baterai sebagai koreksi usia baterai. Dalam kasus ini baterai yang digunakan adalah jenis baru maka pasti kapasitasnya adalah $100\% = 1$. Dari hasil perhitungan kapasitas sementara yang dikoreksi didapatkan kapasitas penuh baterai total yaitu 659 Ah.

Untuk menentukan efisiensi baterai, membutuhkan data $V_{\text{discharge}}$ dan V_{charge} dari datasheet baterai, dan untuk energi adalah jumlah kali Watt dengan detik terdischarge dan jumlah kali Watt dengan detik tercharge (dalam hal ini detik sama sehingga bisa dicoret. Dari datasheet didapatkan Ketika discharge selama 11 jam, kapasitasnya menjadi 90 Ah, sehingga bisa didapatkan efisiensi baterai adalah $V_{\text{dis}} \text{ dibagi } V_{\text{charge}}$ kemudian dikali Energi keluar per energi masuk. Didapatkan hasil efisiensi baterai adalah 0,86341.

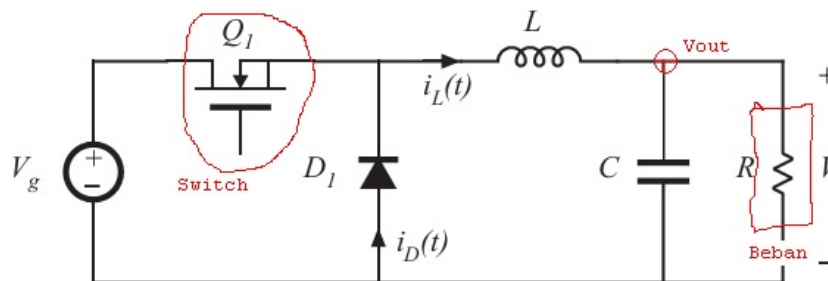
Dilakukan perhitungan serupa dengan superkapasitor melihat datasheet dan didapatkan efisiensi yang sangat tinggi 0,99622 namun kekurangan dari

superkapasitor ini adalah Ketika dia dalam keadaan floating, daya yang terbangun lebih besar daripada baterai.

Mempertimbangkan tegangan nominal dan kapasitas baterai, didapatkan baterai yang dibutuhkan adalah 28 baterai untuk mode baterai saja, dan 30 superkapasitor untuk mode superkapasitor saja, namun yang dengan optimal bisa dilakukan adalah dengan hybrid baterai dan superkapasitor dengan porsi 80% adalah baterai dan dua kali 20% adalah superkapasitor, mengingat kondisi floating superkapasitor, didapatkan total (2x6) 24 baterai parallel dengan total (3x4) 12 superkapasitor. Namun yang perlu diperhatikan adalah dua kali 20% adalah 20% diparalel di baterai untuk memperbaiki naik turunnya daya (karena dalam frekuensi rendah, superkapasitor bersifat kapasitif) sedangkan 20% lainnya ada di bus AC (karena dalam frekuensi yang lebih tinggi dari 10^1 Hz dan kurang dari 10^2 Hz superkapasitor akan berfungsi sebagai storage karena sifatnya resistif).

Setelah mendapatkan daya hasil koreksi efisiensi storage, dilakukan perhitungan dengan mengambil dari datasheet Solar Charge Controller, untuk batas discharge dan batas charge untuk mendapatkan efisiensi dari solar charge, dalam kasus ini penulis mengasumsikan baterai di charge secara CC/CV (constant voltage/constant current) sehingga selalu pada 48V, sehingga didapatkan efisiensi dari Solar Charge adalah 0,94614.

Perlu diperhatikan dalam melakukan metode charge seperti ini perlu dilakukan penstabilan tegangan dengan cara memasang tambahan DC-DC converter untuk mendapatkan tegangan stabil di 48VDC. Dari panel combiner didapatkan tegangan nominal untuk off-grid adalah 150VDC, sehingga perlu DC-DC tipe buck converter.



Gambar 4.11 Desain Buck Converter yang Digunakan

Persamaan Buck Converter

$$V_{out} = V_{in} \cdot D \quad (1)$$

$$48 = 150 \cdot D$$

$$D = 0,32$$

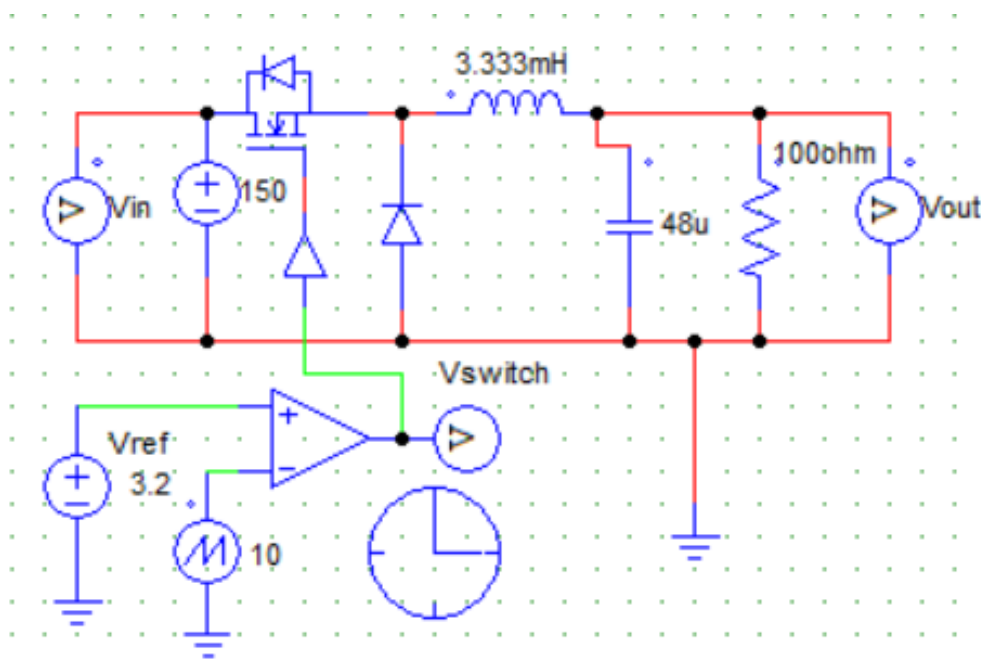
Maka bisa dibuat simulasi untuk Buck Converter di PSIM oleh penulis dengan mengasumsikan nilai R dan L terlebih dahulu untuk mencari C dengan switch dipasang D = 0,32 (di switch adalah 0,32 dikali 360 derajat sehingga didapatkan 115,2 derajat). Asumsi ripple tegangan sebesar 0,01V, frekuensi switch 10 kHz, R = 100 ohm.

$$C = V_{in} \cdot D + \Delta V \cdot \frac{(1 - D)}{f \cdot R \cdot \Delta V} \quad (2)$$

$$C = 150 \cdot 0,32 + 0,01 \cdot \frac{(1 - 0,32)}{10k \cdot 100 \cdot 0,01}$$

$$C = 48,000005 \mu\text{F}$$

Berikut ini adalah simulasi converter yang digunakan di PSIM.

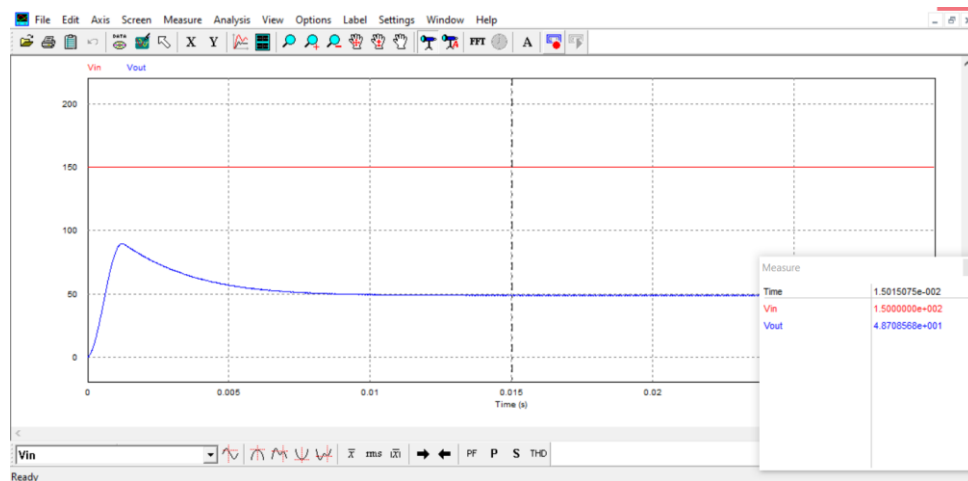


Gambar 4.12 Simulasi Desain Buck Converter pada PSIM yang Digunakan

Dari hasil simulasi PSIM didapatkan tegangan output konstan 48V dari tegangan input 150V, dalam simulasi masih terdapat overshoot dikarenakan simulasi buck converter adalah simulasi buck converter open-loop jadi

mengabaikan perbaikan konstanta proporsional, integral, dan diferensial untuk mendapatkan hasil yang lebih bagus seperti di close-loop.

Penulis merasa bahwa tidak diperlukan juga perbaikan overshoot di awal karena nantinya buck converter akan digunakan secara kontinyu sehingga perbaikan overshoot di awal hanya untuk alasan keamanan saja.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Tegangan pada PSIM yang Digunakan

Kemudian dilakukan sizing solar combiner, ukuran kabel, dan kapasitas pengamanan.

Dari masukan Buck Converter telah didapatkan dibutuhkan 150VDC masukan, sedangkan dari datasheet PV, seri 8 modul dari PV telah mencapai kurang lebih 143VDC, ini masuk kedalam toleransi tegangan combiner yaitu naik turun 5% atau 7,5VDC, sehingga bisa dicari ukuran kabel yang digunakan di masing-masing titik.

Dari titik-titik yang bisa dievaluasi dipilih untuk tingkat tegangan yang sama untuk menentukan kabel yang sama.

Kabel yang digunakan untuk kabel DC ditentukan oleh penulis adalah kabel NYA atau NYAF.

Titik pertama yang akan dievaluasi adalah kabel untuk titik sambung PV dengan tegangan masing-masing 17,9VDC, kemudian titik kedua yang akan dievaluasi adalah kabel untuk sambungan PV ke combiner yang posisinya 200 meter dari tempat PV, ada di peta di bab sebelumnya, yaitu di rumah. Titik terakhir

yang dievaluasi adalah keluaran dari Buck Converter yaitu kabel yang memiliki tegangan 48VDC.

Dari tabel kabel NYA dan NYAF dalam lampiran, didapatkan di titik pertama ada 8 modul seri, 8 sumber arus di seri menghasilkan arus maksimal 8 dikali $6,71 = 53,68$ kemudian dikalikan faktor pengali keamanan 1,25 menjadi 67,1 dibulatkan keatas menjadi 73 bertipe jaringan udara, sehingga di titik pertama dibutuhkan NYAF 10 mm². Total Panjang yang dibutuhkan akan dihitung setelah melihat layout.

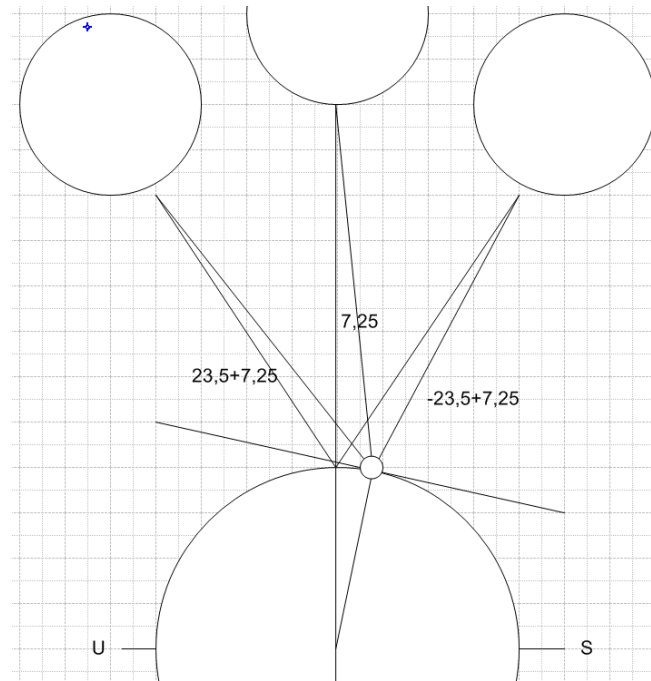
Untuk titik kedua karena terdapat 2 string parallel masing-masing berisi 8 modul seri maka dikalikan 2 sejumlah parallel menjadi 134,2 dibulatkan keatas menjadi 158 bertipe jaringan udara, sehingga di titik kedua dibutuhkan NYAF 35 mm². Total Panjang yang dibutuhkan adalah 200 meter sejauh jarak rumah ke modul terpasang, memasang titik tegangan tertinggi sebagai saluran transmisi juga bisa mengurangi rugi-rugi pada jaringan.

Untuk titik ketiga adalah setelah Buck Converter yaitu keluaran 48VDC, arus per jam tertinggi (300W dibagi tegangan nominal 48V) dikalikan faktor keamanan 1,25 didapatkan 7,8125 dibulatkan keatas menjadi 15 bertipe jaringan dalam pipa sehingga di titik ketiga dibutuhkan NYAF 1,5 mm² atau NYAF 2,5 mm². Total Panjang yang dibutuhkan membutuhkan layout untuk bisa dihitung.

Untuk pengaman dari layout kasar pada spreadsheet jelas bisa dilihat bahwa perlu pengaman pada sisi masukan (setelah combiner dan sebelum solar charge controller) untuk pengamanan DC ground fault, adapun pengaman DC yang lain perlu dipasang (menurut penulis perlu ada 3 pengaman DC) di beberapa titik DC yang lain untuk tujuan pengamanan jaringan ketika ada pemeliharaan di jaringan (berfungsi seperti NH Fuse atau Fuse Link di Jaringan Tegangan Menengah), kemudian untuk sisi AC perlu ada pengaman juga (setelah keluaran inverter dan sebelum masukan distribution channel ke beban) untuk apabila terjadi gangguan dari sisi beban seperti korsleting. Terakhir diberikan lightning arrester pada sistem untuk menjaga dari gangguan surja petir.

Kemudian selanjutnya masuk kedalam sizing PV, Telah didapatkan keseluruhan sistem PV, maka bisa dipetakan berapa output keluaran PV dengan syarat kemiringan PV harus mendekati 90 derajat tegak lurus terhadap PV.

Diketahui bahwa lokasi yang diambil adalah Gubeng, Surabaya, dimana menurut Google Maps berada pada secara geografis berada pada $07^{\circ}09'00''$ – $07^{\circ}21'00''$ Lintang Selatan dan $112^{\circ}36'00''$ - $112^{\circ}54'00''$ Bujur Timur



Gambar 4.14 Solar Elevation di Indonesia

Kemudian direncanakan derajat kemiringan dari awal kita tahu bahwa kemiringan matahari dari garis khatulistiwa adalah 23,5 ke utara dan 23,5 ke selatan pada waktu tertentu.

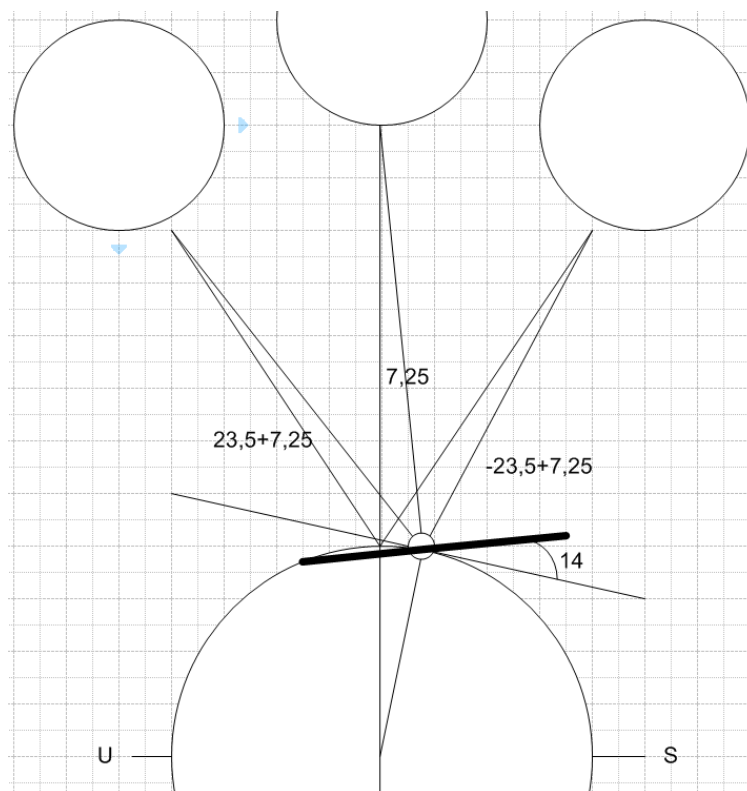
Dengan bantuan Microsoft Excel bisa didapatkan kemiringan dari setiap hari selama 2020 untuk menentukan sudut kemiringan Matahari di Surabaya. Kemudian Langkah selanjutnya adalah memilah Musim Hujan dan Musim Kemarau untuk dicari masing-masing rata-rata kemiringan Matahari di Musim tersebut.

Tujuannya adalah untuk mengeliminasi kemiringan saat Musim Hujan untuk optimasi daya input saat musim Kemarau. Didapatkan Rata-rata untuk musim kemarau adalah 21 derajat dan untuk musim hujan adalah -7 derajat (positif berarti matahari lebih ke utara, negative berarti matahari lebih ke selatan). Penulis mengasumsikan di musim hujan, sesuai data historis, setiap 4 hari ada 3 hari hujan dan sehari tidak hujan sehingga ada potensi di musim hujan terdapat matahari penuh. Sehingga didapatkan sudut kemiringan PV.

$$\begin{aligned}
 \text{Tilt} &= \frac{\text{Rainy Days} \times \Delta\text{Degrees}}{\text{Sample Days}} + \text{Minimum Degrees} & (3) \\
 \text{Tilt} &= \frac{3 \times (21 - (-7))}{4} + -7 \\
 \text{Tilt} &= \frac{3 \times (28)}{4} + -7 \\
 \text{Tilt} &= 21 - 7 \\
 \text{Tilt} &= 14
 \end{aligned}$$

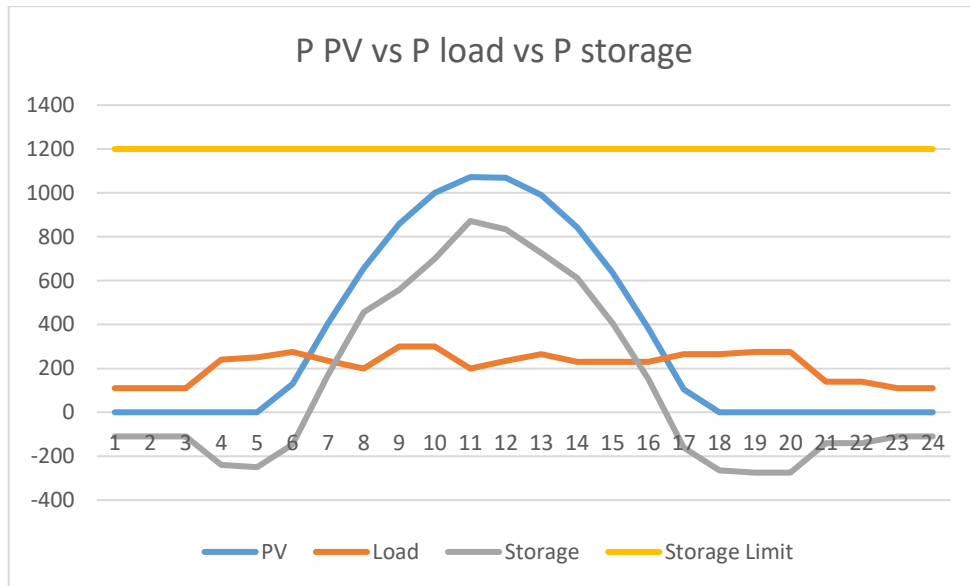
Dari perhitungan didapatkan kemiringan optimal modul PV adalah 14 derajat.

Dengan sudut kemiringan 14 derajat kita bisa memproyeksikan hasil output daya PV yang sesuai dengan kondisi real dari hasil pendekatan peta Wattpeak, namun bisa mendapatkan hasil berapa per jam daya output dan berapa per jam daya yang disimpan di baterai dengan kondisi penulis memilih 2 paralel string masing-masing 8 seri (16 PV module).



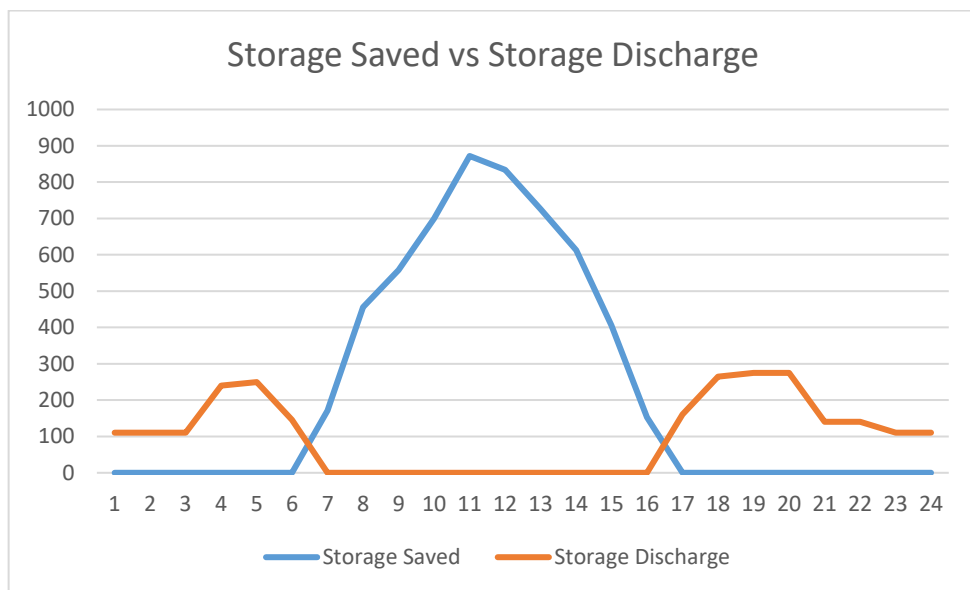
Gambar 4.15 Rencana Kemiringan PV Sesuai Solar Elevation di Indonesia

Kemudian diambil grafik untuk storage untuk penentuan *backup system installation cost*. Dalam hal ini diambil diesel untuk kemungkinan terburuk.



Gambar 4.16 Perbandingan Daya PV, Beban, dan Baterai

Adapun grafik perbandingan penyimpanan energi charge dan discharge.



Gambar 4.17 Perbandingan Daya PV, Beban, dan Baterai

Dari kedua grafik diatas bisa dicari berapa hari matahari penuh baterai akan terisi penuh dan berapa hari hujan penuh dari baterai penuh hingga habis hingga membutuhkan genset untuk menyala. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kapasitas genset diesel yang dibutuhkan.

	hari ke	1	2	3	4	5	6
condition		1	1	1	1	1	1
psaved	0	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2
pstoragelimit		31920	31920	31920	31920	31920	31920
pinstorag	0	3046,2	6092,4	9138,59	12184,8	15231	18277,2
pneed		0	0	0	0	0	0
diesel		belumsia mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati
pdiesel	5100	0	0	0	0	0	0

	7	8	9	10	11	12	13	14
condition	1	1	1	1	1	0	0	0
psaved	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	0	0	0
pstoragelimit	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920
pinstorag	21323,4	24369,6	27415,8	30462	31920	26820	21720	16620
pneed	0	0	0	0	0	-5100	-5100	-5100
diesel	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati
pdiesel	0	0	0	0	0	0	0	0

	15	16	17	18	19	20	21	22
condition	0	0	0	0	1	1	1	1
psaved	0	0	0	0	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2
pstoragelimit	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920
pinstorag	11520	6420	1320	0	3046,2	6092,4	9138,59	12184,8
pneed	-5100	-5100	-5100	-5100	0	0	0	0
diesel	siap mati	siap mati	belumsia nyala	belumsia nyala	belumsia mati	siap mati	siap mati	siap mati
pdiesel	0	0	3780	5100	0	0	0	0

	23	24	25	26	27	28	29	30
condition	1	1	1	1	1	1	1	1
psaved	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2	3046,2
pstoragelimit	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920	31920
pinstorag	15231	18277,2	21323,4	24369,6	27415,8	30462	31920	31920
pneed	0	0	0	0	0	0	0	0
diesel	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati	siap mati
pdiesel	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.18 Scheduling Kebutuhan Backup System

Dari tabel diatas dapat diketahui dengan sistem yang sudah terpasang bisa memenuhi kapasitas baterai dari nol hingga penuh selama 11 hari, dan ketika penuh sampai habis membutuhkan 6 hari hujan berturut-turut. Di hari ke 7 hujan genset akan membantu baterai sebesar 3780W dan dihari ke 8 hujan akan full genset 5100W. Namun kondisi 8 hari hujan berturut-turut akan sangat jarang ditemui mengingat secara historis dalam 4 hari selalu ada 1 hari cerah sehingga kasus terburuk kapasitas genset diesel hanya perlu 3780W dibulatkan keatas, Genset 4000W atau 5000W mungkin sudah memenuhi kebutuhan.

Maka sesuai dengan tujuan penentuan harga akan dilakukan rancangan anggaran total untuk mendapatkan kebutuhan harga setiap rumah 450 VA (per 5,1 kWd) di tempat pengambilan data sesuai spesifikasi. Untuk renewable energy dalam bentuk wind turbine dan PLTA akan lebih mudah karena output sudah dalam bentuk AC, sedangkan untuk PV perlu dilakukan dengan detail karena output PV adalah DC.

Pada estimasi harga ini akan dibuat 2 jenis Rencana Anggaran Biaya. Untuk Sistem Standalone tahan lama dengan Baterai, atau Sistem Standalone Hybrid Storage.

Rancangan Anggaran Biaya Standalone Battery Only

BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
PV PANEL			0
HUMLESS 130WP	16	1.690.000,00	27040000
CONNECTOR + MC4	16	720000	11520000
			0
MOUNTING			0
HEXASOLAR			
MOUNTING KIT	2	5000000	10000000
			0
CABLE			0
NYAF 10mm	16	18000	288000
NYAF 35mm	200	46000	9200000
NYAF 2,5mm	10	7500	75000
			0
INVERTER			0
ATO-PSWI-5004	1	2243700	2243700
			0
SOLAR CHARGE CONTROLLER			0
PICOGLF 10KW			
48V240VS	1	44595000	44595000
			0
DC-DC CONVERTER			0
CONV-DCDC-10KW-			
BCFI-01-H	1	5000000	5000000
			0
PANEL COMBINER			0
MIDNITE SOLAR			
MNPV6	1	1935000	1935000
			0
CB AND DS			0
FPV-125 2PDC	3	223000	669000
FE-125 2PAC	1	125000	125000
MNDC-GFP80	1	810000	810000
			0
STORAGE			0
AMARON QUANTA			
BATTERY	28	1838000	51464000
TOTAL			164964700

Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan

Perhari 5,1 kWh x Rp1468 = Rp7487

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan Rp164964700 / Rp7487 = 22034 hari

= 60,37 tahun

Rancangan Anggaran Biaya Standalone Hybrid Storage

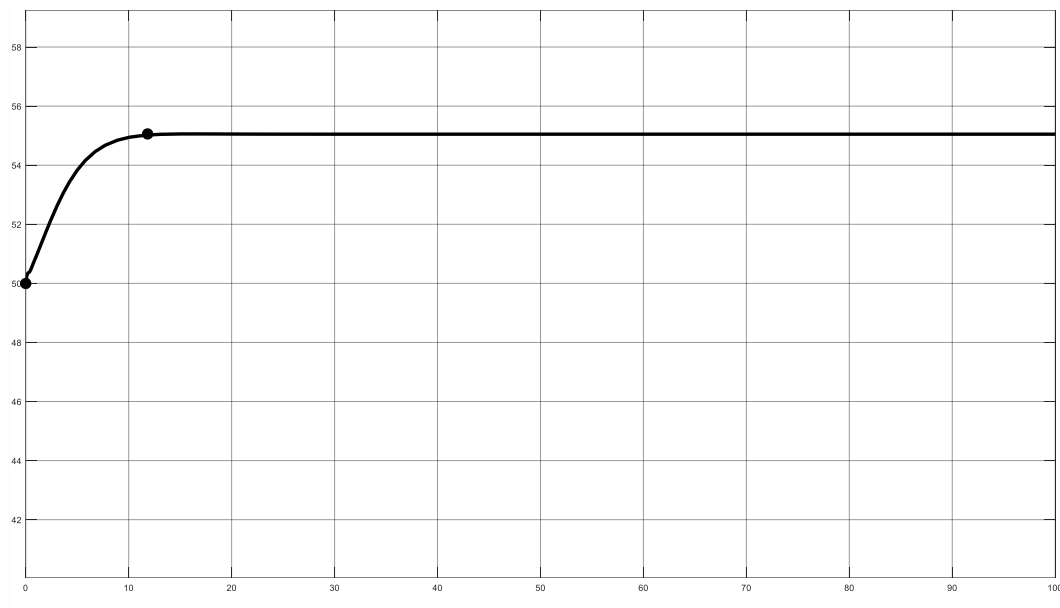
BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
PV PANEL			0
HUMLESS 130WP	16	1.690.000,00	27040000
CONNECTOR + MC4	16	720000	11520000
			0
MOUNTING			0
HEXASOLAR			
MOUNTING KIT	2	5000000	10000000
			0
CABLE			0
NYAF 10mm	16	18000	288000
NYAF 35mm	200	46000	9200000
NYAF 2,5mm	10	7500	75000
			0
INVERTER			0
ATO-PSWI-5004	1	2243700	2243700
			0
SOLAR CHARGE			
CONTROLLER			0
PICOGLF 10KW			
48V240VS	1	44595000	44595000
			0
DC-DC CONVERTER			0
CONV-DCDC-10KW-			
BCFI-01-H	1	5000000	5000000
			0
PANEL COMBINER			0
MIDNITE SOLAR			
MNPV6	1	1935000	1935000
			0
CB AND DS			0
FPV-125 2PDC	3	223000	669000
FE-125 2PAC	1	125000	125000
MNDC-GFP80	1	810000	810000
			0
STORAGE			0
AMARON QUANTA			
BATTERY	24	1838000	44112000
MAXWELL DURABLU			
SC	12	345000	4140000
			0
TOTAL			161752700

Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan
Perhari $5,1 \text{ kWh} \times \text{Rp}1468 = \text{Rp}7487$

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan $\text{Rp}161752700 / \text{Rp}7487 = 21605 \text{ hari}$
 $= 59,19 \text{ tahun}$

4.6 Studi Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (*Hydropower Real Efficiency Calculation*) dan Performa Stabilitas Frekuensi Skenario *Swing Generator*

Adapun hasil simulasi awal untuk plant tanpa control adalah sebagai berikut:



Gambar 4.19 Hasil Frekuensi Simulasi Plant Uncontrolled

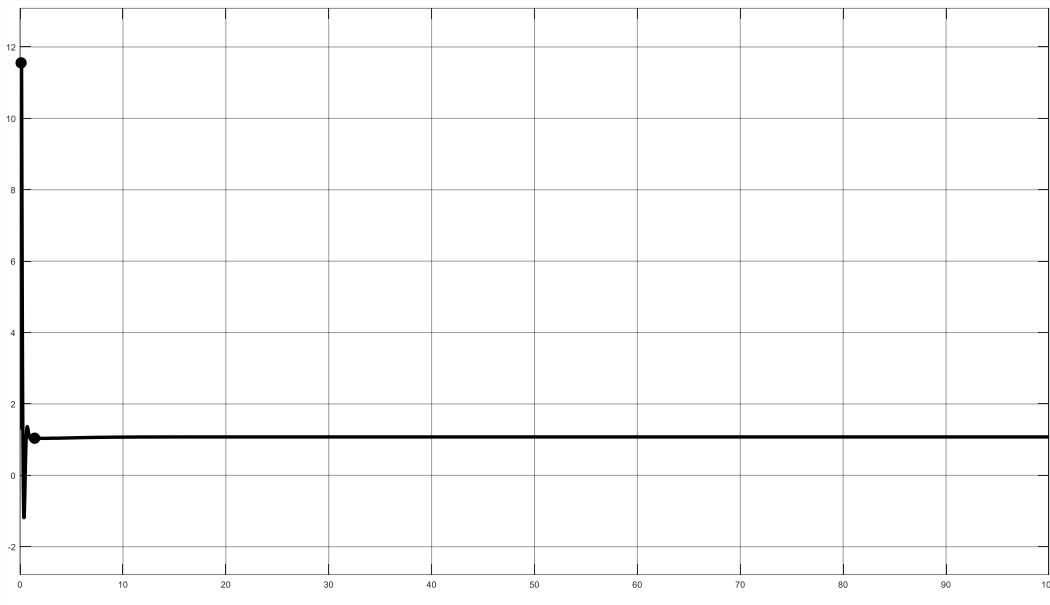
▼ Measurements

	Time	Value
1	0.000e+00	49.996
2	11.836	55.058
ΔT	11.836 s	ΔY 5.062e+00

Gambar 4.20 Hasil Frekuensi Simulasi Plant Uncontrolled

Dari hasil simulasi uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan sampai di steady state saat 11,836 sekon.

Untuk overshoot uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan mencapai overshoot pada 55,058 Hz.



Gambar 4.21 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant Uncontrolled

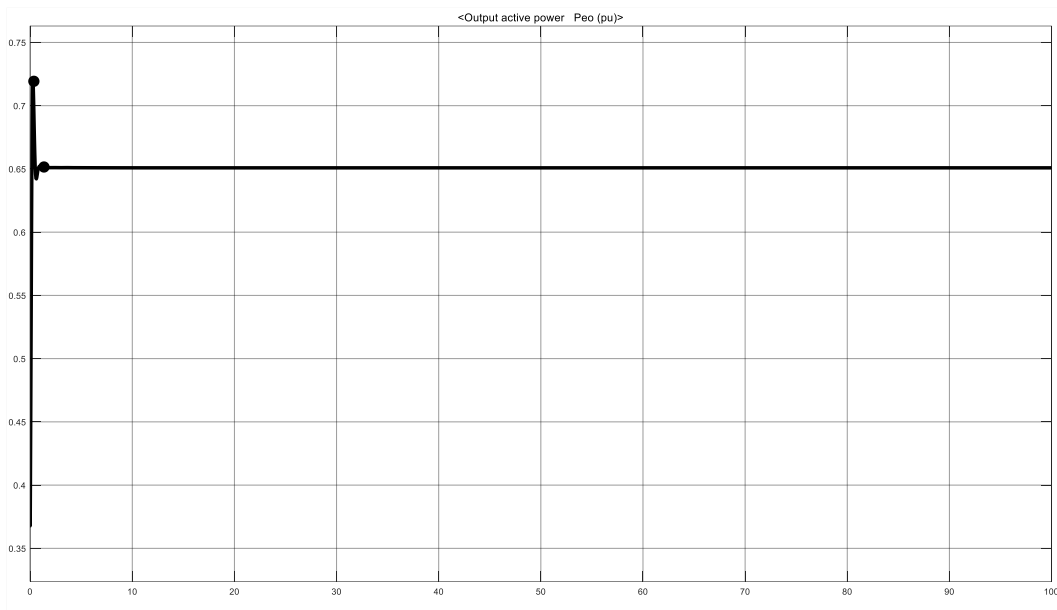
▼ Measurements

	Time	Value
1	0.098	11.555
2	1.414	1.040
ΔT	1.315 s	ΔY 1.051e+01

Gambar 4.22 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu Uncontrolled

Dari hasil simulasi uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan medan akan sampai di steady state saat 1,414 sekon dengan tegangan sebesar 1,040 pu.

Untuk overshoot uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan akan mencapai overshoot pada tegangan impuls 11,555 pu.



Gambar 4.23 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant Uncontrolled Dalam Satuan pu

▼ Measurements

	Time	Value
1	1.353	0.652
2	0.363	0.719
ΔT	990.099 ms	ΔY 6.776e-02

Gambar 4.24 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu Uncontrolled

Dari hasil simulasi uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan sampai di steady state saat 1,353 sekon dengan daya sebesar 0,652 pu.

Untuk overshoot uncontrolled didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan mencapai overshoot pada daya impuls 0,719 pu.

Maka dari simulasi ini didapatkan efisiensi daya sebesar 0,652 pu. Atau 65,2% dari daya maksimal yang seharusnya didapatkan.

Berikutnya akan dilakukan tuning untuk kontrol PI pada LFC dengan Ziegler Nichols Type 1 dan PSO. Kemudian akan dilakukan perbandingan metode yang mana yang akan memberikan stabilitas frekuensi terbaik diamati dalam overshoot.

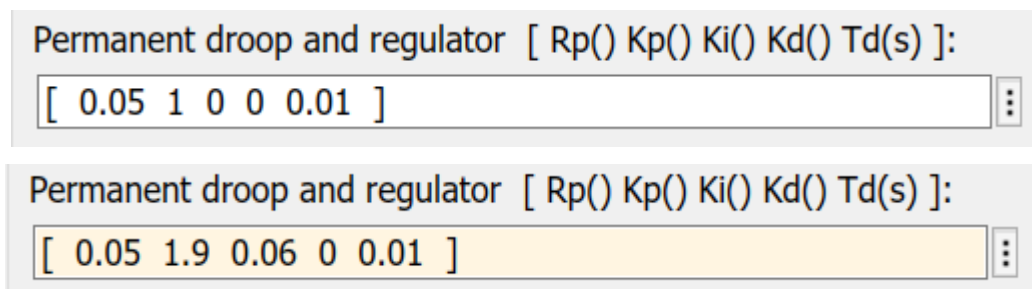
Adapun Ziegler Nichols Type 1 yang dipakai penulis sebagai referensi adalah sebagai berikut:

Controller Type	Kp	Ti	Td
P	T/L	~	0
PI	0,9 T/L	L/0,3	0
PID	1,2 T/L	2 L	0,5 L

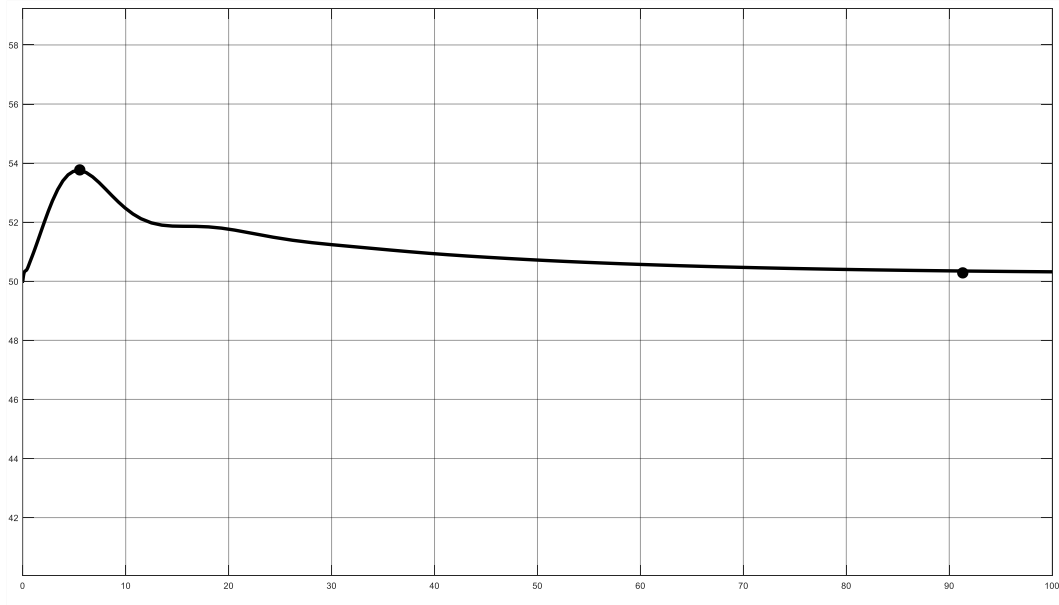
Gambar 4.25 Tuning Ziegler Nichols Type 1

Pada simulasi plant uncontrolled didapatkan bahwa T sekitar $\sim 3,8$ s dan L sekitar $\sim 0,018$.

Dari metode tuning Ziegler Nichols pada tabel untuk PI Controller didapatkan Kp adalah 1,9, Ki adalah 0,06. Setting dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.26 Parameter PI sebelum dan sesudah tuning Ziegler Nichols Type 1



Gambar 4.27 Hasil Frekuensi Simulasi Plant *Ziegler Nichols*

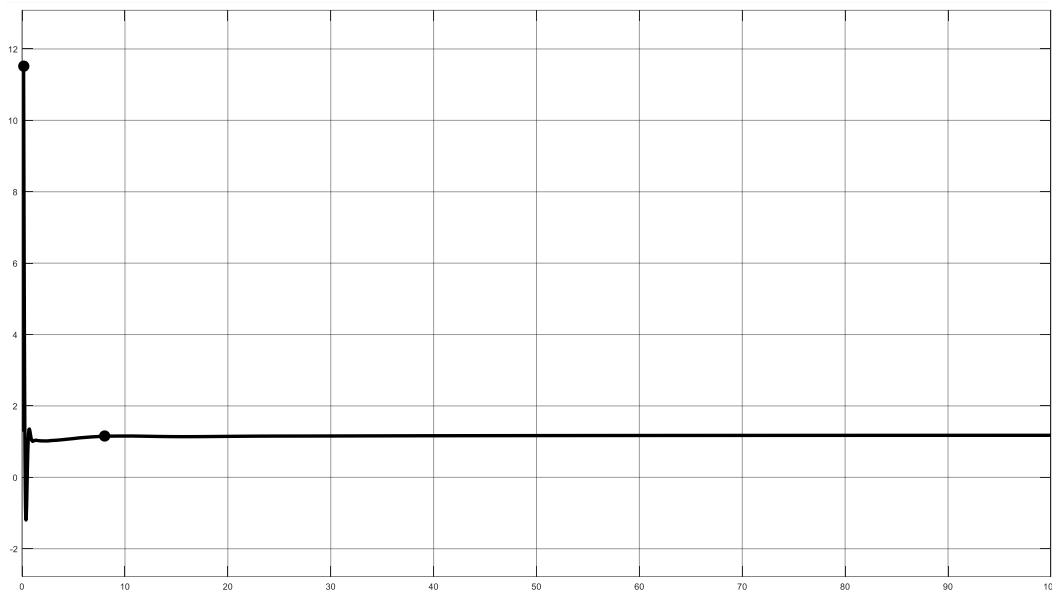
▼ Measurements

	Time	Value
1	91.311	50.285
2	5.541	53.771
ΔT	85.770 s	ΔY 3.486e+00

Gambar 4.28 Hasil Rekam Hasil Frekuensi Fungsi Waktu Ziegler Nichols

Dari hasil simulasi *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan sampai di steady state saat 91,311 s dengan frekuensi 50,285 Hz.

Untuk overshoot *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan mencapai overshoot pada 53,771 Hz.



Gambar 4.29 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant *Ziegler Nichols*

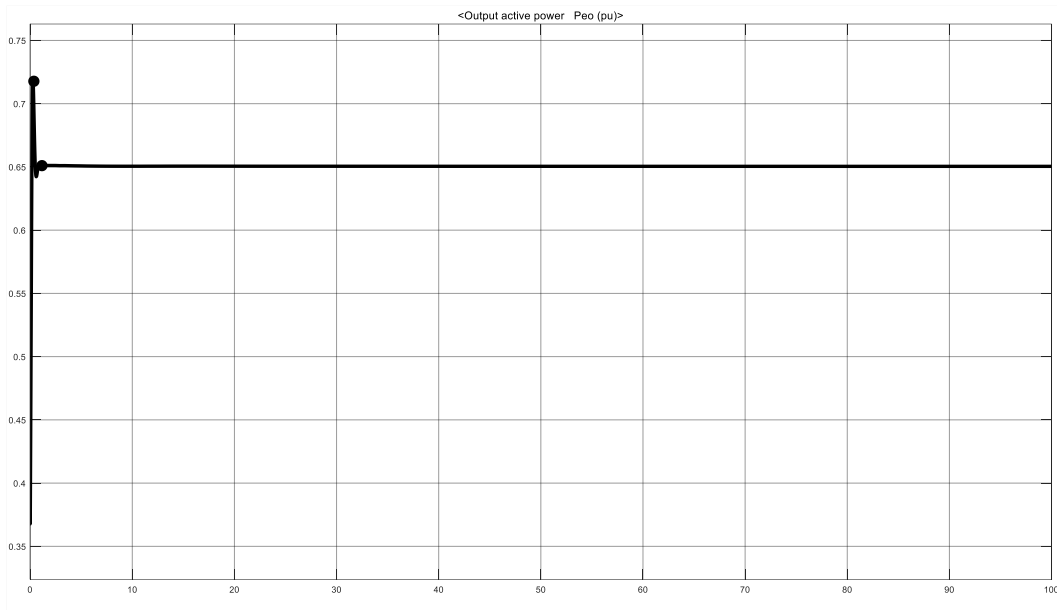
▼ Measurements

	Time	Value
1	0.164	11.518
2	8.028	1.158
ΔT	7.864 s	ΔY 1.036e+01

Gambar 4.30 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu *Ziegler Nichols*

Dari hasil simulasi *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan medan akan sampai di steady state saat 8,028 sekon dengan tegangan sebesar 1,158 pu.

Untuk overshoot *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan akan mencapai overshoot pada tegangan impuls 11,518 pu.



Gambar 4.31 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant *Ziegler Nichols* Dalam Satuan pu

▼ Measurements

	Time	Value
1	1.155	0.651
2	0.363	0.718
ΔT	792.079 ms	ΔY 6.672e-02

Gambar 4.32 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu *Ziegler Nichols*

Dari hasil simulasi *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan sampai di steady state saat 1,155 sekon dengan daya sebesar 0,651 pu.

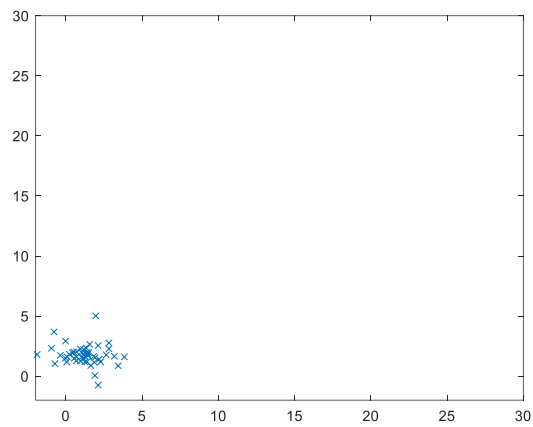
Untuk overshoot *Ziegler Nichols* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan mencapai overshoot pada daya impuls 0,718 pu.

Adapun hasil simulasi PSO yang didapatkan dari running program dari MATLAB yang dipakai penulis sebagai referensi adalah sebagai berikut:

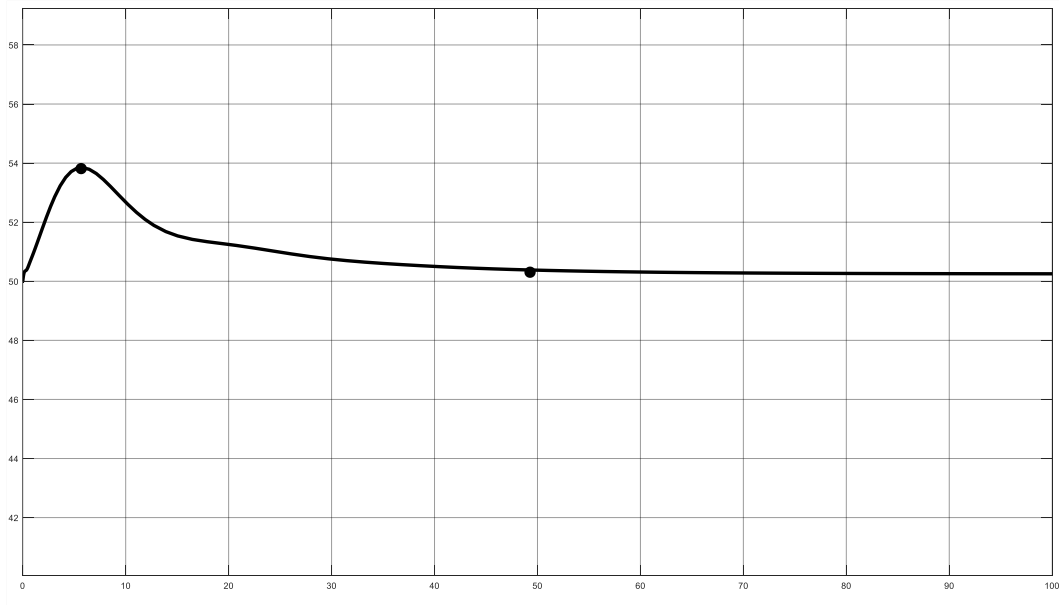
I	49
index	50
iter	50
iterations	50
j	7
Ki	0.8810
Kp	1.6331
n	49
particle	49x4x2 double
Q	1x1 tf
temp	5.4371
W	0.9000
Z	1x1 struct

Gambar 4.33 Hasil *Tuning PSO*

Dari metode tuning PSO didapatkan Kp adalah 1,6331, Ki adalah 0,0881 (dari program Ki dibagi 10 karena tidak terbaca saat dalam skala 1 maka hasil harus dikali 10 yang dimunculkan di MATLAB), dan Kd adalah 0. Setting dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.34 Hasil *Parameter PI-Control PSO*



Gambar 4.35 Hasil Frekuensi Simulasi Plant *PSO*

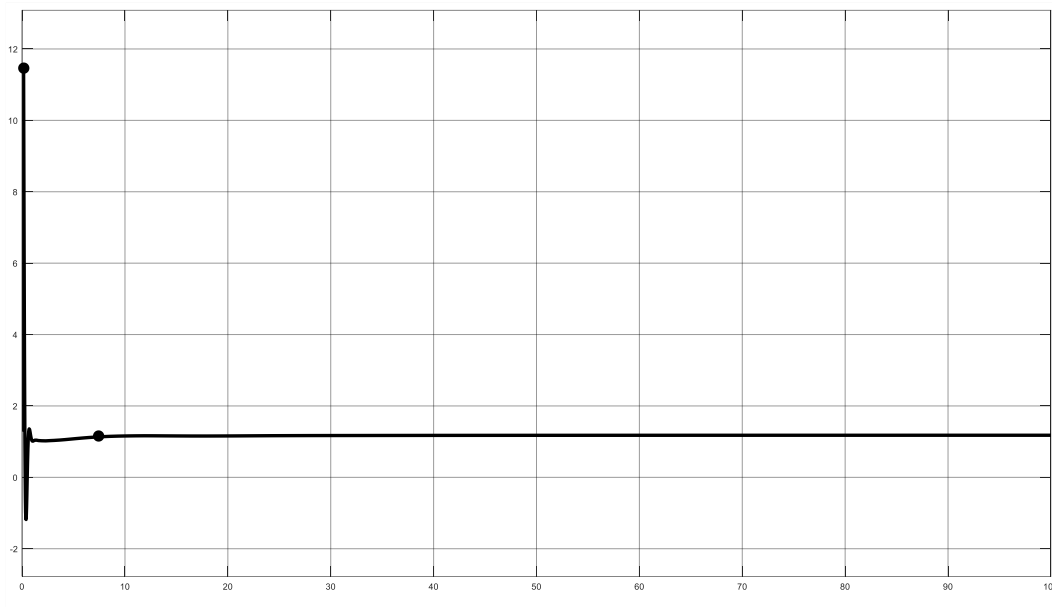
▼ Measurements

	Time	Value
1	49.279	50.307
2	5.672	53.815
ΔT	43.607 s	ΔY 3.508e+00

Gambar 4.36 Hasil Rekam Hasil Frekuensi Fungsi Waktu *PSO*

Dari hasil simulasi *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan sampai di steady state saat 49,279 s dengan frekuensi 50,307 Hz.

Untuk overshoot *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka akan mencapai overshoot pada 53,815 Hz.



Gambar 4.37 Hasil Tegangan Medan Sistem Eksitasi Simulasi Plant *PSO*

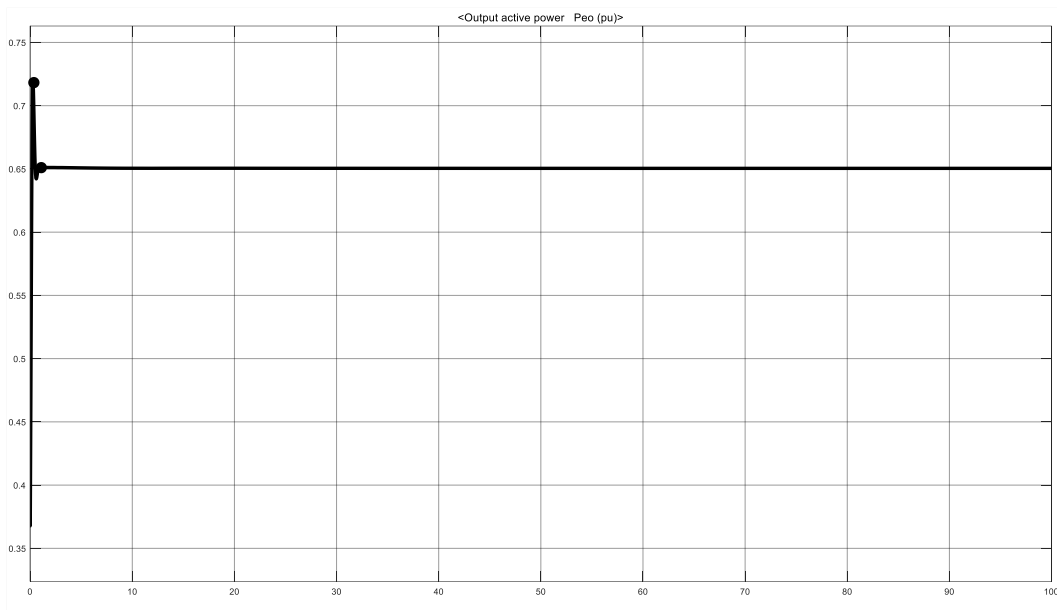
▼ Measurements

	Time	Value
1	0.164	11.463
2	7.438	1.158
ΔT	7.274 s	ΔY 1.031e+01

Gambar 4.38 Hasil Rekam Tegangan Medan Sistem Eksitasi Fungsi Waktu *PSO*

Dari hasil simulasi *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan medan akan sampai di steady state saat 7,438 sekon dengan tegangan sebesar 1,158 pu.

Untuk overshoot *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka tegangan akan mencapai overshoot pada tegangan impuls 11,463 pu.



Gambar 4.39 Hasil Daya Terbangkit Simulasi Plant *PSO* Dalam Satuan pu

▼ Measurements

	Time	Value
1	1.089	0.651
2	0.363	0.718
ΔT	726.073 ms	ΔY 6.724e-02

Gambar 4.40 Hasil Rekam Daya Terbangkit Fungsi Waktu *PSO*

Dari hasil simulasi *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan sampai di steady state saat 1,089 sekon dengan daya sebesar 0,651 pu.

Untuk overshoot *PSO* didapatkan bahwa ketika plant diberikan debit air maka daya akan mencapai overshoot pada daya impuls 0,718 pu.

Tabel 4.9 Perbandingan Frekuensi Simulasi PLTA

Metode	Frekuensi Overshoot	Waktu Steady State	Frekuensi Steady State
Uncontrolled	55,058 Hz	11,836 s	55,058 Hz
Ziegler-Nichols	53,771 Hz	91,311 s	50,285 Hz
PSO	53,815 Hz	49,279 s	50,307 Hz

Didapatkan hasil yang lebih baik pada tuning *PSO* daripada metode lain dikarenakan adanya percepatan waktu steady state kembali ke frekuensi asal,

meskipun dibandingkan dengan tuning Ziegler Nichols frekuensi lebih tinggi pada PSO sekitar 0,04%.

Sedangkan untuk percepatan waktu steady state, PSO lebih baik daripada Ziegler Nichols sebesar 42,032 s atau lebih cepat 46,03%.

Tabel 4.10 Perbandingan Tegangan Simulasi PLTA

Metode	Tegangan Overshoot	Waktu Steady State	Tegangan Steady State
Uncontrolled	11,555 pu	1,414 s	1,040 pu
Ziegler-Nichols	11,518 pu	8,028 s	1,158 pu
PSO	11,463 pu	7,438 s	1,158 pu

Didapatkan hasil yang lebih baik pada tuning PSO daripada metode Ziegler-Nichols (Uncontrolled tidak diperhitungkan karena jika tidak memakai control) dikarenakan adanya waktu steady state yang lebih cepat 7,35% dan overshoot tegangan yang sedikit lebih rendah dari Ziegler Nichols sebesar 0,47%.

Tabel 4.11 Perbandingan Daya Simulasi PLTA

Metode	Daya Overshoot	Waktu Steady State	Daya Steady State
Uncontrolled	0,719 pu	1,353 s	0,652 pu
Ziegler-Nichols	0,718 pu	1,155 s	0,651 pu
PSO	0,718 pu	1,089 s	0,651 pu

Didapatkan hasil yang lebih baik pada tuning PSO daripada metode Ziegler-Nichols (Uncontrolled tidak diperhitungkan karena jika tidak memakai control) dikarenakan adanya waktu steady state yang lebih cepat sebesar 5,71%.

4.7 Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Air (*Hydropower Installation Cost and Sizing*)

Sub bab ini akan membahas hasil dari pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air dengan beberapa tambahan komponen yang dibutuhkan seperti pengaman dan kabel, dan ada beberapa kondisi yang diberlakukan terhadap sistem yang telah dimodelkan. Kondisi pertama yaitu melihat BEP ketika menggunakan tambahan LFC sebagai sistem kendali stabilitas frekuensi, dan kondisi kedua yaitu ketika tidak menggunakan LFC sebagai sistem kendali stabilitas frekuensi. Kemudian dibandingkan yang lebih ekonomis mempertimbangkan kualitas daya output. Berikut adalah rancangan anggaran biaya untuk setiap komponen yang digunakan.

Persamaan untuk penentuan diameter penstock menggunakan rumus Sarkaria:

$$Diameter = 3,55 \times \left(\frac{Water\ Discharge^2}{(Maximum\ Water\ Velocity)^2} \right)^{0,25} \quad (4)$$

$$Diameter = 3,55 \times \left(\frac{7,6^2}{(2 \times 9,81 \times 18,5)} \right)^{0,25}$$

$$Diameter = 3,55 \times \left(\frac{57,76}{(362,97)} \right)^{0,25}$$

$$Diameter = 3,55 \times (0,16)^{0,25}$$

$$Diameter = 3,55 \times 0,6316$$

$$Diameter = 2,242\ m \sim 2,5\ m$$

Dalam hal ini tidak diperhitungkan biaya konstruksi (tukang dan ahli bangunan) dan hanya memperhitungkan biaya peralatan yang dibutuhkan).

Rancangan Anggaran Biaya PLTA Tanpa LFC

BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
PENSTOCK			0
PIPA BAJA SPIRAL WELDED CARBON CONNECTOR	96 x 18m	8896230	15372685440
WELDED CARBON	96	720000	69120000
			0
PINTU AIR INTAKE			0
PINTU AIR HOT DIP DOUBLE + GOVERNOR SET	8	14000000	108000000
			0
TURBIN			0
5 MW TURBINE KAPLAN RUNNER	32	691929000	22141728000
			0
GENERATOR			0
NIIGATA TOSHIBA 10MVA GENERATOR	16	7060500000	112968000000
			0
KABEL			0
KABEL SUPREME NYA 400mm ROLL 10M	96	546000	52416000
			0
CB AND DS			0
LBS - Type QM + FUSE ARC 20KV 1KA	8	53527000	428216000
LBS - Type QM + FUSE ARC 20KV 10KA	1	70000000	70000000
			0
TOTAL			151210165440

Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan Efektif Perhari 0,65p.u (65% dari 130MW) = 84500 kWh x 24 x Rp1468 = Rp2977104000

Dengan pendekatan memperhitungkan biaya dan jasa konstruksi bendungan air dan pembuatan pondasi dan juga power house untuk bendungan air yang hampir meliputi 95% biaya utama sehingga biaya diatas hanya 5%.

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan $Rp151210165440 \times (100\%/5\%) / Rp2977104000 = 1016 \text{ hari} = 2,79 \text{ tahun}$

Rancangan Anggaran Biaya PLTA Dengan LFC

BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
PENSTOCK			0
PIPA BAJA SPIRAL WELDED CARBON CONNECTOR	96 x 18m	8896230	15372685440
WELDED CARBON	96	720000	69120000
			0
PINTU AIR INTAKE			0
PINTU AIR HOT DIP DOUBLE + GOVERNOR SET	8	14000000	108000000
			0
TURBIN			0
5 MW TURBINE KAPLAN RUNNER	32	691929000	22141728000
			0
GENERATOR			0
NIIGATA TOSHIBA 10MVA GENERATOR	16	7060500000	112968000000
			0
KABEL			0
KABEL SUPREME NYA 400mm ROLL 10M	96	546000	52416000
			0
CB AND DS			0
LBS - Type QM + FUSE ARC 20KV 1KA	8	53527000	428216000
LBS - Type QM + FUSE ARC 20KV 10KA	1	70000000	70000000
			0
LFC			0
WOODWARD DIGITAL SYNCRONIZER AND LOAD CONTROLLER	8	9641376	77131008
			0
TOTAL			151287296448

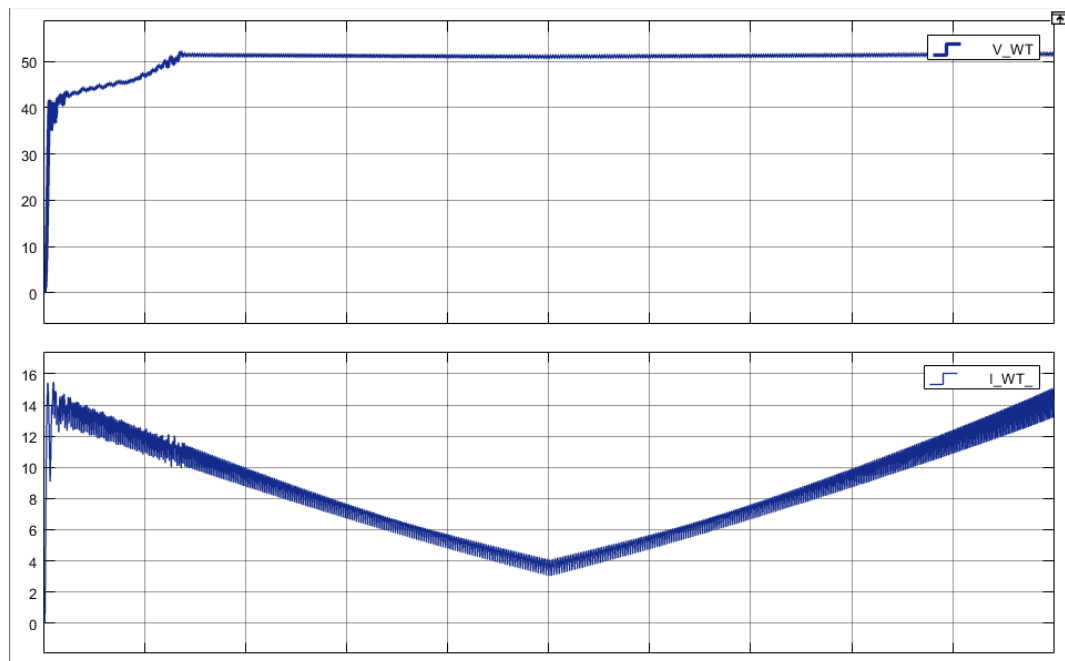
Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan Efektif Perhari 0,65p.u (65% dari 130MW) = 84500 kWh x 24 x Rp1468 = Rp2977104000

Dengan pendekatan memperhitungkan biaya dan jasa konstruksi bendungan air dan pembuatan pondasi dan juga power house untuk bendungan air yang hampir meliputi 95% biaya utama sehingga biaya diatas hanya 5%.

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan $\text{Rp}151287296448 \times (100\%/5\%) / \text{Rp}2977104000 = 1017 \text{ hari} = 2,80 \text{ tahun}$

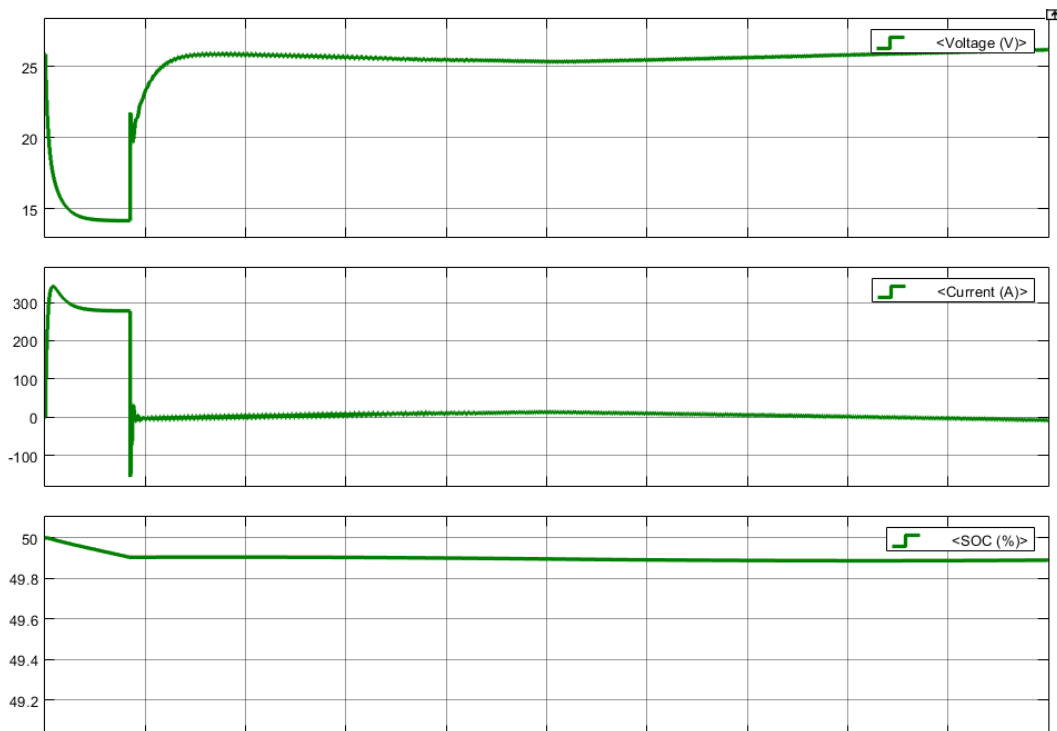
4.8 Simulasi Sistem Pembangkit Energi Terbarukan Wind Turbine Dengan Menggunakan Penyimpan Energi Dalam Skenario *Renewable Energy Off-Grid*

Sub-bab ini bertujuan untuk memberikan perbandingan sistem penyimpanan salah satu sumber energi terbarukan. Sistem penyimpanan yang akan dibandingkan adalah sistem Wind Turbine-Baterai dan Wind Turbine-Baterai-Superkapasitor sebagai representatif sistem energi terbarukan *off-grid* untuk pertimbangan penggunaan penyimpan energi listrik paling optimal dan ekonomis. Perbandingan akan dilakukan menggunakan semua peralatan yang sama untuk mendapatkan perbandingan yang optimal. Aspek yang akan diteliti adalah efisiensi daya, tegangan dan stabilitas daya pada sistem. Komponen yang digunakan dalam simulasi diberi nilai dan komponen tetap, memberikan pendekatan terbaik dalam perbandingan aspek.



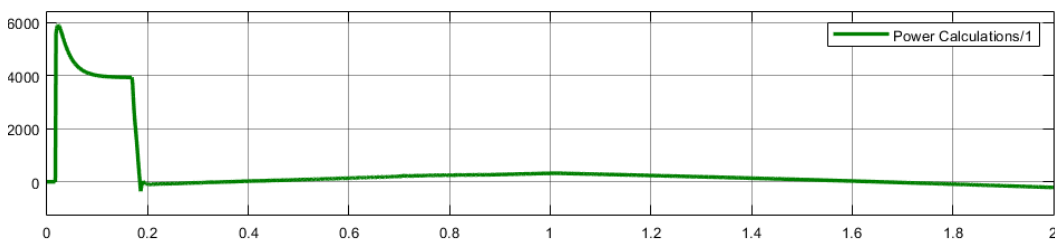
Gambar 4.41 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan Keluaran WT

Karakteristik modul WT adalah sama untuk semua simulasi karena inputnya sama untuk keadaan yang berbeda. Hasilnya diketahui stabil dalam hal tegangan, dengan kecepatan angin input dari 12 m/s mencapai 9 m/s. Namun arus memiliki karakteristik yang hampir sama dengan masukan kecepatan angin.



Gambar 4.42 Hasil Simulasi Arus, Tegangan dan SOC Baterai Skenario Baterai-WT

Baterai bertindak sebagai kompensator daya untuk beban karena daya untuk beban diberikan dari WT dan baterai. Baterai akan mendukung sistem dengan menyediakan kebutuhan daya untuk beban. Daya dari WT ke beban melalui penyimpanan baterai hampir sama dengan daya dari WT langsung ke beban.



Gambar 4.43 Hasil Simulasi Daya Baterai Skenario Baterai-WT

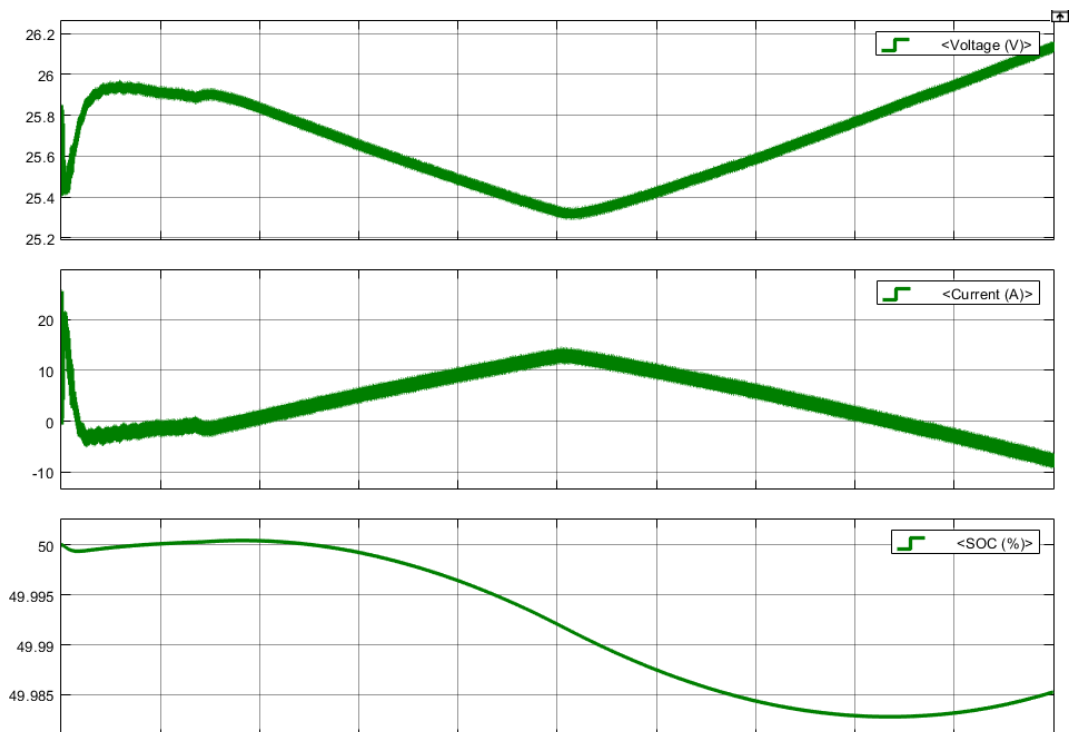
Daya yang disediakan oleh baterai akan mengikuti beban, karena nilai daya yang menghasilkan radiasi melebihi nilai daya beban, modul PV akan menghasilkan jumlah daya rendah yang stabil, sehingga baterai akan memberikan karakteristik yang sama, jumlah daya yang stabil. Namun, jika nilai daya pembangkit iradiasi berada di bawah nilai daya beban, modul PV akan

menghasilkan daya yang tidak stabil mengikuti nilai daya beban. Baterai akan bertindak sebagai kompensator sehingga beban akan tetap bernilai konstan.

Kemudian berikut adalah hasil simulasi menggunakan skenario *hybrid storage* baterai dan superkapasitor. Fase 1 adalah ketika kecepatan angin turun ke puncak lembah 9 m/s (paling besar angin saat malam), sedangkan fase 2 adalah ketika kecepatan angin kembali ke 12 m/s.

Baterai tetap dalam kondisi stabil, mengikuti kondisi awal untuk fase 1 dimana WT menghasilkan daya, baterai sedang ikut berkontribusi karena kapasitas total beban lebih rendah dari nilai daya yang menghasilkan WT. Untuk superkapasitor, dengan nilai awal 100%, superkapasitor memberikan daya selama waktu respons baterai, setelah waktu respons baterai, superkapasitor mulai ikut berkontribusi daya dalam jumlah kecil karena sudah disuplai oleh baterai.

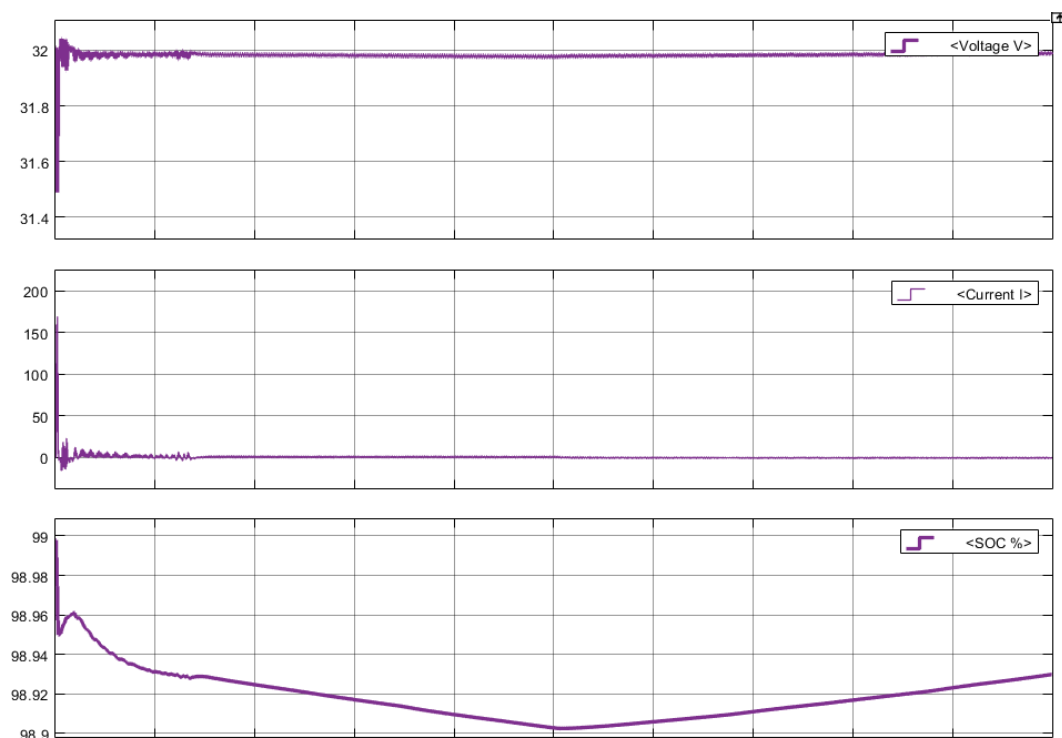
Fase 2, baterai masih menyuplai daya beban sampai nilai daya yang dihasilkan WT melebihi nilai daya beban. Setelah itu, baterai akan mulai menyimpan daya dari hasil sisa daya yang dihasilkan WT. Superkapasitor, sebaliknya, akan memberikan kontribusi dan mendapatkan daya secara langsung.



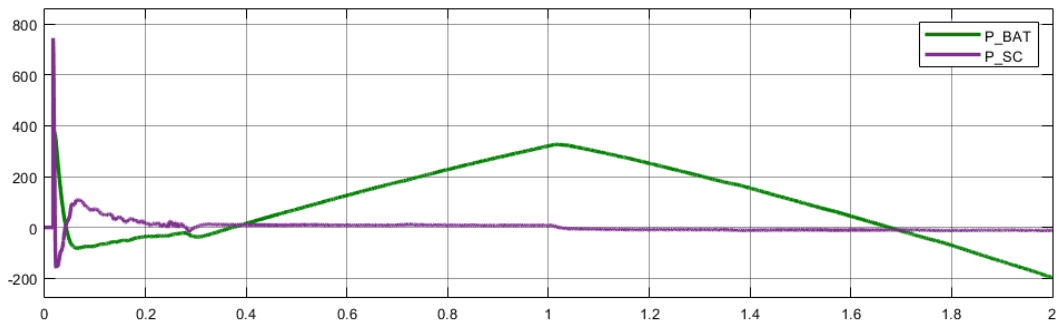
Gambar 4.44 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Baterai Skenario *Hybrid Storage-WT*

Inilah perbandingan antara karakteristik penyimpanan hanya baterai dengan karakteristik penyimpanan hibrida. Baterai juga memberikan jumlah daya yang dibutuhkan beban, tetapi lebih stabil karena efek osilasi yang dihilangkan dalam superkapasitor. Superkapasitor masih bersifat kapasitor, menjadi filter efek osilasi pada baterai dan mengkompensasi kebutuhan daya untuk beban dalam waktu respon baterai.

Daya penyimpanan yang dihasilkan yang utama disediakan oleh baterai dalam sistem hybrid. Superkapasitor memberi sistem sedikit daya. Superkapasitor memberikan tegangan dan kontribusi daya yang lebih stabil dalam sistem dengan menyerap semua efek osilasi. Daya dari WT ke dalam beban melalui penyimpanan, bagaimanapun, kekurangan daya dari sistem yang hanya menggunakan baterai karena pemakaian sendiri yang tinggi oleh karakteristik superkapasitor.



Gambar 4.45 Hasil Simulasi Arus, Tegangan, dan SOC Superkapasitor Skenario *Hybrid Storage-WT*



Gambar 4.46 Hasil Simulasi Perbandingan Daya Baterai dan Superkapasitor Skenario *Hybrid Storage-WT*

Dari penelitian sebelumnya diperoleh bahwa superkapasitor memiliki kemampuan untuk mengambil dan menghemat energi dari sistem. Dari penelitian ini, kestabilan daya dan tegangan diukur dengan tegangan awal undershoot dan power overshoot tertinggi. Hal ini mengingat start pada baterai-WT beresilasi $\pm 0,601$ V dari tegangan nominal baterai dan daya overshoot pada 372,773 W. Start pada sistem penyimpanan hybrid adalah undershoot -0,512 V dari tegangan penyimpanan nominal tanpa osilasi dan daya overshoot pada 737,213 W. Efisiensi daya diukur dengan berapa banyak daya yang diisi dan dikosongkan ke baterai (baterai memiliki efisiensi daya tertinggi karena tingkat self-discharge rendah). Daya yang lebih rendah masuk ke superkapasitor, berarti lebih banyak daya ke baterai. Ini mengingat daya yang terisi di WT-baterai sepenuhnya masuk ke dalam baterai. Daya yang dibebankan pada kecepatan angin maksimum (12 m/s) di WT-baterai-superkapasitor dibagi, 209,880 W ke dalam baterai, dan rata-rata 12,569 W ke dalam superkapasitor. Artinya, untuk setiap 100% daya yang disimpan, daya ke baterai dikurangi 12,569 W. Semakin tinggi masukan energi, semakin tinggi efisiensi untuk sistem hibrida.

Kesimpulan sementara, dari hasil penelitian didapatkan karakteristik bahwa sistem hybrid memberikan hasil yang lebih baik pada tegangan dan stabilitas daya sistem. Keunggulan dari sistem penyimpanan hybrid adalah superkapasitor pada sistem penyimpanan hybrid memberikan kontribusi untuk menyerap efek osilasi, tetapi memberikan kontribusi yang lebih sedikit untuk distribusi daya, kecuali pada waktu respon baterai, superkapasitor memberikan daya untuk sistem. Setelah baterai masuk ke dalam sistem, baterai akan menyumbangkan daya

sebagian besar untuk sistem karena karakteristik efisiensinya yang lebih tinggi. Namun, terdapat juga kekurangan pada sistem penyimpanan hybrid yaitu untuk setiap daya yang dibebankan ke dalam penyimpanan, superkapasitor selalu menyimpan nilai tetap rata-rata sebesar 12,569 W dan pada penyinaran maksimum yang diuji, efisiensi untuk sistem hibrida berada pada 94,350%. Input energi yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih tinggi untuk sistem penyimpanan hybrid.

4.9 Penentuan Biaya Investasi berdasarkan Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Angin (*Wind Turbine Installation Cost and Sizing*)

Sub bab ini akan membahas hasil dari pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan beberapa tambahan komponen yang dibutuhkan seperti pengaman dan kabel, dan ada beberapa kondisi yang diberlakukan terhadap sistem yang telah dimodelkan. Kondisi pertama yaitu melihat BEP ketika tanpa menggunakan superkapasitor sebagai sistem kendali stabilitas frekuensi, dan kondisi kedua yaitu ketika menggunakan superkapasitor sebagai sistem kendali stabilitas frekuensi. Kemudian dibandingkan yang lebih ekonomis untuk kondisi tertentu. Berikut adalah rancangan anggaran biaya untuk setiap komponen yang digunakan.

Dalam hal ini tidak diperhitungkan biaya konstruksi (tukang dan ahli bangunan) dan hanya memperhitungkan biaya peralatan yang dibutuhkan).

Rancangan Anggaran Biaya Wind Turbine Tanpa Superkapasitor

BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
WIND TURBINE			0
5 BLADES 500 W WIND TURBINE	1	5200000	5200000
CONNECTOR + MC4	1	720000	720000
			0
MOUNTING			0
STAINLESS STEEL MOUNTING POLE	1	1563423	1563423
			0
CABLE			0
NYAF 10mm	16	18000	288000
NYAF 35mm	20	46000	920000
NYAF 2,5mm	10	7500	75000
			0
INVERTER			0
ATO-PSWI-5004	1	2243700	2243700
			0
DC-DC CONVERTER			0
CONV-DCDC-10KW- BCFI-01-H	1	5000000	5000000
			0
CB AND DS			0
FPV-25 2PDC	3	223000	669000
FE-25 2PAC	4	125000	500000
MNDC-GFP80	1	810000	810000
			0
STORAGE			0
AMARON QUANTA BATTERY	32	1838000	58816000
			0
TOTAL			83421123

Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan Efektif Perhari = 5,1 kWh/day x Rp1468 = Rp7487

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan Rp83421123 / Rp7487 = 11143 hari
= 30,53 tahun

Rancangan Anggaran Biaya Wind Turbine Dengan Superkapasitor

BARANG	JMLH	HARGA	TOTAL
WIND TURBINE			0
5 BLADES 500 W WIND TURBINE	1	5200000	5200000
CONNECTOR + MC4	1	720000	720000
			0
MOUNTING			0
STAINLESS STEEL MOUNTING POLE	1	1563423	1563423
			0
CABLE			0
NYAF 10mm	16	18000	288000
NYAF 35mm	20	46000	920000
NYAF 2,5mm	10	7500	75000
			0
INVERTER			0
ATO-PSWI-5004	1	2243700	2243700
			0
DC-DC CONVERTER			0
CONV-DCDC-10KW- BCFI-01-H	1	5000000	5000000
			0
CB AND DS			0
FPV-25 2PDC	3	223000	669000
FE-25 2PAC	4	125000	500000
MNDC-GFP80	1	810000	810000
			0
STORAGE			0
AMARON QUANTA BATTERY	32	1838000	58816000
MAXWELL DURABLUE SC	12	345000	4140000
			0
TOTAL			87561123

Maka bisa dihitung BEP dengan Asumsi Harga Listrik 2020 = Kebutuhan

Efektif Perhari = 5,1 kWh/day x Rp1468 = Rp7487

Waktu Balik Modal Tanpa Penjualan Rp87561123 / Rp7487 = 11696 hari
= 32,05 tahun

4.10 Penentuan Efisiensi Per Pembangkit dan Komparasi Kombinasi

Pembangkit Terpasang Kasus Off-Grid (*Efficiency-per-Combination Calculation*)

Berikut hasil yang didapatkan untuk efisiensi dari setiap kombinasi pembangkit terpasang dengan menggunakan konfigurasi Off-Grid 3 DG dari IEEE 9-Bus. Telah dihitung juga waktu balik modal untuk setiap kombinasi dan rekomendasi yang optimal untuk penggunaan baik secara ekonomis.

PLN memiliki rentang maksimal usia panel surya adalah 30 tahun (10950 hari) dan rentang usia turbin angin adalah 20 tahun (7300 hari), namun untuk PLTA diberikan rentang usia tertinggi yaitu 50 tahun (18250 hari). Maka BEP dihitung sesuai dengan rentang usia yang diberikan.

Dalam skenario tanpa untung, pelanggan yang memiliki panel surya dengan menggunakan superkapasitor menghabiskan biaya Rp161752700 dibagi 10950 hari = Rp14772 kemudian dibagi dengan penggunaan per hari 5,1 kWh/day yaitu sekitar Rp2897 ~ Rp2900 per kWh.

Untuk pelanggan yang memiliki wind turbine dengan menggunakan superkapasitor menghabiskan biaya Rp87561123 dibagi 7300 hari = Rp11995 kemudian dibagi dengan penggunaan per hari 5,1 kWh/day yaitu sekitar Rp2352 ~ Rp2400 per kWh.

Untuk pelanggan yang memiliki PLTA dengan menggunakan LFC menghabiskan biaya Rp151287296448 dibagi 18250 hari = Rp8289715 kemudian dibagi dengan penggunaan per hari 2028000 kWh/day yaitu sekitar Rp5 ~ Rp100 per kWh.

Tabel 4.12 Tabel kebutuhan maksimal per kWh tiap skenario Off-Grid 3 DG

Photovoltaic	Wind Turbine	Hydropower	Total Cost per kWh (Rp)
3	0	0	2900
2	1	0	2734
1	2	0	2567
1	1	1	1800
2	0	1	1967
1	0	2	1034
0	1	2	867
0	2	1	1634
0	3	0	2400
0	0	3	300

Untuk kasus dengan nilai dibawah harga sistem, didapatkan kasus 3 PLTA, kasus 2 PLTA dan 1 turbin angin atau 1 panel surya.

Untuk efisiensi harga 3 PLTA didapatkan selisih harga per kWh kasus dengan harga per kWh PLN saat ini dibagi harga per kWh PLN saat ini, didapatkan efisiensi harga tertinggi yaitu mencapai 79,56%. Sedangkan untuk efisiensi harga 2 PLTA dengan 1 turbin angin didapatkan mencapai 40,95%, dan untuk efisiensi harga 2 PLTA dengan 1 panel surya didapatkan mencapai 29,60%. Dalam hal ini 3 PLTA jelas memiliki efisiensi tertinggi dan juga pembangkit yang digunakan homogen (PLTA saja) sehingga dapat dieliminasi dari opsi, sehingga didapatkan efisiensi tertinggi pada 2 PLTA dengan 1 turbin angin.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi Power Flow Tracing untuk IEEE 9-Bus yang didasarkan untuk Pembangkit Energi Terbarukan, didapatkan hasil bahwa untuk daya aktif bisa langsung dilakukan *tracing* dengan logika incidence matrix sehingga hasil yang didapatkan langsung secara linear, sedangkan untuk perhitungan daya reaktif menggunakan bantuan *imaginary bus* menghasilkan hasil yang lebih valid untuk perhitungan daya reaktif per bus meskipun menjadikan iterasi sedikit lebih banyak daripada perhitungan *tracing* daya aktif.

Dari hasil perhitungan penentuan harga untuk masing-masing jenis pembangkit energi terbarukan yang dihitung (*Photovoltaic*, *Wind Turbine*, dan PLTA), didapatkan hasil bahwa secara ekonomis, kombinasi yang paling bagus adalah 2 PLTA dengan 1 turbin angin dengan harga per kWh nya adalah Rp867 dan 2 PLTA dengan 1 panel surya dengan harga per kWh nya adalah Rp1034 . Untuk efisiensi tertinggi didapatkan dari kombinasi 2 PLTA dengan 1 turbin angin dengan tingkat efisiensi sebesar 40,95%.

Semoga dengan adanya penelitian ini dapat membantu penelitian ketenagalistrikan selanjutnya khususnya di bidang simulasi tenaga listrik dan energi terbarukan untuk penentuan harga yang lebih bisa dipertanggungjawabkan. Rekomendasi dari penulis adalah dengan membuat regulasi terkait hasil penelitian ini untuk menjadi *Standing Operaiton Procedure* (SOP) untuk industri tenaga listrik khususnya PLN.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Bialek, "Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1185-1193, Aug. 1997
- [2] K. Xie, C. Li and Y. Liu, "Tracing power flow from generators to loads and branches using incidence matrix multiplication," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009, pp. 1-7.
- [3] F. Dietzel, "Compressor and Pump Turbines," Translated version in academic purposes,, 1988.
- [4] M. Kuzlu, M. Pipattanasompom, and S. Rahman, "A comprehensive review of smart grid related standards and protocols," in *Proc. 5th Int. Istanbul Smart Grid Cities Congr. Fair (ICSG)*. Apr. 2017, pp. 12–16.
- [5] Y. Yoldaş, A. Önen, S. Muyeen, A. V. Vasilakos, and İ. Alan, "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 205–214, May 2017.
- [6] X. Yu and Y. Xue, "Smart Grids: A cyber-physical system perspective," *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1058-1070, May 2016
- [7] Y. K. Peña, J. C. Nieves, A. Espinoza, C. E. Borges, A. Peña, and M. Ortega, "Distributed semantic architecture for smart grids," *Energies*, vol. 5, no. 11, pp. 4824–4843, 2012.
- [8] X. Dong *et al.*, "Power Flow Analysis Considering Automatic Generation Control for Multi-Area Interconnection Power Networks," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5200-5208, Nov.-Dec. 2017.
- [9] Fang Dazhong, Dong Liangying and T. S. Chung, "Power flow analysis of power system with UPFC using commercial power flow software," 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), Singapore, 2000, pp. 2922-2925 vol.4.
- [10] X. Li, L. Wang, W. Xie and Y. Wu, "Electricity Sales Price Model Considering the Purchasing Power of Users and Their Regional Differences," 2009 Second International Conference on Information and Computing Science, Manchester, 2009, pp. 216-220.

- [11] Yuhong Zhang, Ming Zhou and Gengyin Li, "Wind power price regulation considering wind power fluctuation," *2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS)*, Beijing, 2010, pp. 1-4.
- [12] H. Wang and H. Bao, "A new method of congestion management based on power flow tracing," *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Xi'an, 2016, pp. 1-4.
- [13] D. Asija, P. Choudekar, K. M. Soni and S. K. Sinha, "Power flow study and contingency status of WSCC 9 Bus test system using MATLAB," *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, Noida, 2015, pp. 338-342.
- [14] J. B. S. Nazaran and K. Selvi, "Reactive power loss allocation using optimal tracing method," *2010 Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies*, Karur, 2010, pp. 1-6.
- [15] T. L. Vandoorn, B. Renders, L. Degroote, B. Meersman and L. Vandeveldel, "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 139-151, March 2011.
- [16] Z. Liu *et al.*, "Typical island micro-grid operation analysis," *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Xi'an, 2016, pp. 1-4.
- [17] K. Moslehi and R. Kumar, "Smart Grid - a reliability perspective," *2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Gothenburg, 2010, pp. 1-8.
- [18] S. F. Hui, H. F. Ho, W. W. Chan, K. W. Chan, W. C. Lo and K. W. E. Cheng, "Floating solar cell power generation, power flow design and its connection and distribution," *2017 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*, Hong Kong, 2017, pp. 1-4.
- [19] E. Imamura and Y. Uchiyama, "Analysis of financial support for photovoltaic system installation with the economic simulation model," *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Waikoloa, HI, 1994, pp. 2258-2261 vol.2.
- [20] C. Chandraratne, R. T. Naayagi and T. Logenthiran, "Smart grid protection through self-healing," *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, Auckland, 2017, pp. 1-6.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Case 4 is to remove one of the generators, assuming a swing bus combination is used. This aims to determine the contribution of power losses from each transmission network from each generator.

Data Dummy IEEE 9-Bus (4.1 dan 4.2)

Bus	Voltage	Angle	-----Load-----		---
Generation---	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW
Mvar	Mvar	Injected			
1	1.040	0.000	0.000	0.000	66.984
26.866	0.000				
2	1.025	9.688	0.000	0.000	163.200
6.045	0.000				
3	1.025	5.086	0.000	0.000	85.000
-11.728	0.000				
4	1.026	-2.072	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000				
5	0.995	-3.782	125.842	50.327	0.000
0.000	0.000				
6	1.013	-3.372	87.705	29.235	0.000
0.000	0.000				
7	1.026	4.123	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000				
8	1.017	1.210	96.879	33.894	0.000
0.000	0.000				
9	1.033	2.388	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000				
Total			310.426	113.456	315.184
21.183	0.000				

Hasil Simulasi Power Flow Tracing Dummy IEEE 9-Bus (4.1 dan 4.2)

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--	
Transformer		MW	Mvar	MVA	MW	
from	to					
Mvar	tap					
1		66.984	26.866	72.171		
	4	66.984	26.866	72.171	0.003	
2.774						
2		163.200	6.045	163.312		
	7	163.200	6.045	163.312	0.016	
15.866						
3		85.000	-11.728	85.805		
	9	85.000	-11.728	85.805	0.004	
4.107						
4		0.000	0.000	0.000		
	1	-66.982	-24.092	71.183	0.003	
2.774						
	5	39.688	23.469	46.108	0.252	-
15.837						
	6	27.294	0.623	27.301	0.133	-
15.707						
5		-125.842	-50.327	135.532		
	4	-39.436	-39.306	55.680	0.252	-
15.837						

19.100	7	-86.406	-11.021	87.106	2.418	-
	6	-87.705	-29.235	92.449		
15.707	4	-27.160	-16.330	31.691	0.133	-
31.360	9	-60.545	-12.905	61.905	1.403	-
	7	0.000	0.000	0.000		
15.866	2	-163.184	9.821	163.479	0.016	
19.100	5	88.823	-8.079	89.190	2.418	-
11.742	8	74.361	-1.742	74.381	0.449	-
	8	-96.879	-33.894	102.637		
21.273	9	-22.968	-23.894	33.142	0.080	-
11.742	7	-73.911	-10.000	74.585	0.449	-
	9	0.000	0.000	0.000		
4.107	3	-84.996	15.834	86.458	0.004	
31.360	6	61.948	-18.455	64.638	1.403	-
21.273	8	23.048	2.620	23.197	0.080	-
	Total loss				4.758	-
92.272						

=====
 ===== Generator P Load
 =====

Bus	Generator ith				
1	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
2	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
3	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
4	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
5	39.436	86.406	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	27.160	0.000	60.545	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
8	0.000	73.911	22.968	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	

total_load_p =

Columns 1 through 5

66.5967 160.3170 83.5123 0 0

Columns 6 through 9

0.0000 0 0 0

total_p_load =

310.4260

===== Generator P Losses
=====

	from	to		Generator	ith	
=====						
=====						
	4	1	0.003	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	7	0.000	0.016	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	3	9	0.000	0.000	0.004	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	4	0.252	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	4	0.133	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	7	5	0.000	2.418	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	9	6	0.000	0.000	1.403	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	9	8	0.000	0.000	0.080	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	8	7	0.000	0.449	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

total_line_loss_p =

Columns 1 through 5

0.3875 2.8830 1.4877 0 0

Columns 6 through 9

0 0 0 0

total_p_loss =

4.7583

=====
=====
Generator Q Losses
=====

	from	to		Generator	ith	
	4	1	1.120	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.651	1.003	0.000	0.000
	2	7	0.000	7.380	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	8.486	0.000	0.000	0.000	0.000
	3	9	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
0.000	0.000	1.774	2.333	0.000	0.000	0.000
	5	10	-3.200	-0.000	-0.000	-
0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
-4.047	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.671						
	6	11	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

-0.000	-7.853	-0.000	-0.000	-0.000	-	
0.000						
	7	12	-0.000	-1.298	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-0.000	-8.252	-0.000	-0.000	-	
0.000						
	9	13	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
-0.000	-0.000	-6.772	-8.907	-0.000	-	
0.000						
	9	14	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
-0.000	-0.000	-4.594	-6.042	-0.000	-	
0.000						
	8	15	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-	
5.871						
	10	1	-3.496	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-4.422	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-	
0.000						
	11	7	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-7.853	-0.000	-0.000	-0.000	-	
0.000						
	12	9	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-0.000	-9.550	-0.000	-0.000	-	
0.000						
	13	4	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-0.000	-0.000	-15.680	-0.000	-	
0.000						
	14	4	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-10.637	-	
0.000						

	15	5	-0.000	-0.000	-0.000	-
0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-
5.871						

total_line_loss_q =

Columns 1 through 5

-5.5760	6.0817	0	0	0.0000
---------	--------	---	---	--------

Columns 6 through 10

0	0	0	0.0000	-8.4697
---	---	---	--------	---------

Columns 11 through 15

-15.7066	-18.9085	-27.6462	-9.6334	-12.4137
----------	----------	----------	---------	----------

total_q_loss =

-92.2725

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR INDEX