



TESIS - EE255401

**ANALISIS PENENTUAN LOKASI DAN
PENAMBAHAN TRAFO AVR 20KV UNTUK
MEMPERBAIKI KUALITAS TEGANGAN, RUGI-RUGI
DAYA DAN TEKNO EKONOMI PADA PENYULANG
CARTENZ DI PLN ULP PRAFI**

ARIS FIRMANSYAH
6022241017

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT
Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ELEKTRIK BERKELANJUTAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
202



TESIS - EE255401

**ANALISIS PENENTUAN LOKASI DAN
PENAMBAHAN TRAFO AVR 20KV UNTUK
MEMPERBAIKI KUALITAS TEGANGAN, RUGI-RUGI
DAYA DAN TEKNO EKONOMI PADA PENYULANG
CARTENZ DI PLN ULP PRAFI**

ARIS FIRMANSYAH
6022241017

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT
Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ELEKTRIK BERKELANJUTAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2025

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

ARIS FIRMANSYAH
NRP: 6022241017

Tanggal Ujian: 13 Juli 2026
Periode Wisuda: September-Oktober 2026

Disetujui oleh :
Pembimbing:

1. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP: 198811082012121001
2. Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 198006032006041003

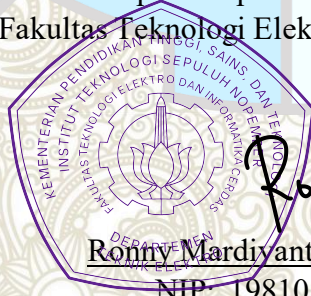


Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.
NIP : 1949201931101
2. Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D.
NIP : 198503272019031006
3. Muhammad Qomaruz Zaman, S.T., M.T., Ph.D.
NIP : 1992202511039



Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Ronny Mardiyanto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 198101182003121003

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “Analisis Penentuan Lokasi Dan Penambahan Trafo AVR 20KV Untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan, Rugi-Rugi Daya dan Tekno Ekonomi Pada Penyulang Cartenz Di PLN ULP Prafi ” 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, 16 Juni 2026



Aris Firmansyah
NRP. 6022241017

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS PENENTUAN LOKASI DAN PENAMBAHAN TRAFO AVR 20KV UNTUK MEMPERBAIKI KUALITAS TEGANGAN, RUGI-RUGI DAYA DAN TEKNO EKONOMI PADA PENYULANG CARTENZ DI PLN ULP PRAFI

Nama mahasiswa : Aris Firmansyah
NRP : 6022241017
Pembimbing : 1. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
2. Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Penyulang Cartenz di PLN ULP Prafi tepatnya di Gardu Hubung Prafi mengalami drop tegangan yaitu sebesar 17,6KV dan rugi daya sebesar 0,19MW. Untuk memperbaiki kondisi tersebut dilaksanakan simulasi penempatan *Trafo AVR* menggunakan *Digsilent* pada 3 titik pilihan dan hasil dari simulasi untuk titik terbaik adalah di titik C yaitu lokasi sebelum masuk GH Prafi dengan nilai tegangan menjadi 19,76 KV dan rugi daya sebesar 0,14 MW. Nilai rupiah yang bisa diselamatkan selama 20 Tahun sesuai lifetime *Trafo AVR* adalah Rp 12.655.572.000 dan nilai kWh yang bisa diselamatkan adalah sebesar 8.760.000 kWh. Dilakukan perhitungan analisis tekno ekonomi untuk proyek pada penelitian ini, yaitu menggunakan metode *Benefit Cost Ratio (BCR)* dengan hasil nilai 2,23 lebih besar dari 1, metode *Net Present Value (NPV)* dengan hasil nilai lebih besar dari nol, metode *Internal Rate of Return (IRR)* dengan hasil nilai lebih besar dari nilai *MARR* yang sudah ditentukan sebelumnya, dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa proyek pemasangan *Trafo AVR* pada penelitian ini dinyatakan Layak untuk dilaksanakan. Sehingga secara teknis untuk proyek pemasangan *Trafo AVR* ini mengalami perbaikan nilai tegangan dan rugi daya serta secara analisis Tekno Ekonomi dinyatakan layak menggunakan 3 metode yang sudah dilaksanakan.

Kata kunci: Jatuh Tegangan, Rugi Daya, *Trafo AVR*, *Digsilent*, Tekno Ekonomi, *Benefit Cost Ratio (BCR)*, *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF LOCATION DETERMINATION AND ADDITION OF 20KV AVR TRANSFORMER TO IMPROVE VOLTAGE QUALITY, POWER LOSSES AND TECHNO ECONOMICS AT THE CARTENZ FEEDER AT PLN ULP PRAFI

By : Aris Firmansyah
Student Identity Number : 6022241017
Supervisor(s) : 1. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
2. Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The Cartenz distribution network at PLN ULP Prafi specifically at the Prafi Substation experienced a voltage drop of 17.6 kV and a power loss of 0.19 MW. To address this issue, a simulation of AVR transformer placement was conducted using Digsilent at three selected locations. The simulation results indicated that the optimal location was Point C the site just before the Prafi Switching Station where the voltage stabilized at 19.76 kV and power loss was reduced to 0.14 MW. The rupiah savings over a 20 year period corresponding to the service life of the AVR transformer amount to Rp 12,655,572,000, and the kWh savings total 8,760,000 kWh. A techno economic analysis was conducted for the project in this study using the Benefit Cost Ratio (BCR) method, yielding a value of 2.23 greater than 1, the Net Present Value (NPV) method, yielding a value greater than zero; and the Internal Rate of Return (IRR) method, yielding a value greater than the previously determined Minimum Acceptable Rate of Return (MARR). Based on these results, it can be concluded that the AVR transformer installation project in this study is deemed feasible. Thus, from a technical standpoint, this AVR transformer installation project improves voltage stability and reduces power losses, and from a techno-economic analysis, it is deemed feasible based on the three methods applied

Keywords : Voltage Drop, Power Loss, AVR Transformer, Digsilent, Technological Economics, Benefit-Cost Ratio (BCR), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR)

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini yang berjudul “Analisis Penentuan Lokasi Dan Penambahan Trafo AVR 20KV Untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan, Rugi-Rugi Daya dan Tekno Ekonomi Pada Penyulang Cartenz Di PLN ULP Prafi”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian tesis ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan moril dan materiil tanpa henti. Doa dan kasih sayang mereka menjadi motivasi terbesar dalam menyelesaikan studi ini.
2. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T. dan Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar membimbing, mengarahkan, dan memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat bagi penulis.
3. Bapak dan Ibu dosen di Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang berguna selama masa perkuliahan.
4. Rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan di masa mendatang. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik elektro.

Surabaya, 16 Juni 2026

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	v
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xx
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	8
2.1 Kajian Penelitian Terkait	8
2.2 Konsep Dasar Sistem Tenaga Listrik	12
2.3 Aspek Perencanaan Jaringan Distribusi	13
2.4 Konfigurasi Jaringan	13
2.5 Parameter Kelistrikan	17
2.6 Parameter Saluran Distribusi	20
2.7 Jatuh Tegangan (<i>Drop Voltage</i>)	23
2.8 Rugi Daya Jaringan	25
2.9 Digsilent Power Factory	26
2.10 Analisa Tekno Ekonomi	27
2.11 Transformator	34
2.12 Prinsip Kerja Transformator	35
2.13 Komponen Transformator	37
2.14 Jenis-Jenis Transformator	42

2.15	Step Voltage Regulator (SVR)	43
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		48
3.1	Alur dan Metodologi Penelitian	48
3.2	Desain Penelitian.....	49
3.3	Metode Analisis Data	50
3.4	Parameter Benefit & Cost.....	53
BAB 4.....		56
4.1	Jadwal Penelitian.....	57
4.2	Pengumpulan Data Single Line Diagram.....	58
4.3	Penginputan Single Line Diagram Ke Aplikasi Digsilent.....	60
4.4	Simulasi Load Flow Digsilent Penyulang Cartenz.....	66
4.5	Perhitungan Detail Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz	67
4.6	Solusi Mengatasi Jatuh Tegangan & Rugi Daya Pada Saluran SUTM...	68
4.7	Penentuan Lokasi Pemasangan Trafo <i>AVR</i>	69
4.8	Perhitungan Nilai Saving Energi Penyulang Cartenz Pasca Pemasangan Trafo <i>AVR</i>	74
4.9	Usia Trafo, Kebutuhan Biaya Investasi & Biaya Pemeliharaan.....	76
4.10	Perhitungan Nilai Tekno Ekonomi	77
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		89
5.1	Kesimpulan.....	89
5.2	Saran	90
DAFTAR PUSTAKA.....		91

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Tegangan Penyulang Cartenz di GH Prafi Load Flow Digsilent	2
Gambar 1. 2 Tegangan Penyulang Cartenz di GH Prafi Pada KWH Meter AMR..	2
Gambar 1. 3 Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz Pada Digsilent	3
Gambar 2. 1 Alur Sistem Tenaga Listrik.....	12
Gambar 2. 2 Konfigurasi Jaringan Distribusi Dasar	14
Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan Tulang Ikan (Fishbone).....	14
Gambar 2. 4 Konfigurasi Jaringan Kluster (Leap Frog).....	15
Gambar 2. 5 Konfigurasi Jaringan Spindel	15
Gambar 2. 6 Konfigurasi Jaringan Fork	16
Gambar 2. 7 Konfigurasi Jaringan Spotload	16
Gambar 2. 8 Konfigurasi Jaringan Jala-Jala (Grid).....	17
Gambar 2. 9 Segitiga Daya.....	20
Gambar 2. 10 Transformator	35
Gambar 2. 11 Prinsip Kerja Transformator	36
Gambar 2. 12 Hubungan Tegangan dan Lilitan Trafo.....	36
Gambar 2. 13 Kumparan Transformator	38
Gambar 2. 14 Inti Besi Transformator.....	38
Gambar 2. 15 Step Voltage Regulator.....	44
Gambar 2. 16 Indikator Posisi Tap SVR	44
Gambar 2. 17 Step Voltage Regulator Jenis A	45
Gambar 2. 18 Step Voltage Regulator Jenis B	46
Gambar 3. 1 Flowchart Metodologi Penelitian	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Jadwal Penelitian	57
Tabel 4.2 Data Penyulang Cartenz	58
Tabel 4.3 Data Penyulang Mawar	59
Tabel 4.4 Data Penyulang Line1	59
Tabel 4.5 Data Impedansi Kabel AAAC (Sumber SPLN 64:1985)	65
Tabel 4.6 Data Rugi Daya & Nilai Tegangan Hasil Simulasi Digsilent	73
Tabel 4.7 Nilai Rugi Daya & Jatuh Tegangan Sebelum & Sesudah Pemasangan Trafo <i>AVR</i>	73
Tabel 4.8 Nilai Rugi Daya dan Nilai Tegangan Penyulang Cartenz Sebelum & Sesudah Pemasangan Trafo <i>AVR</i>	74
Tabel 4.9 Rencana Biaya Pemeliharaan <i>Preventif</i> Trafo <i>AVR</i>	76
Tabel 4.10 Rencana Biaya Pembelian & Pemasangan Trafo <i>AVR</i>	77

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

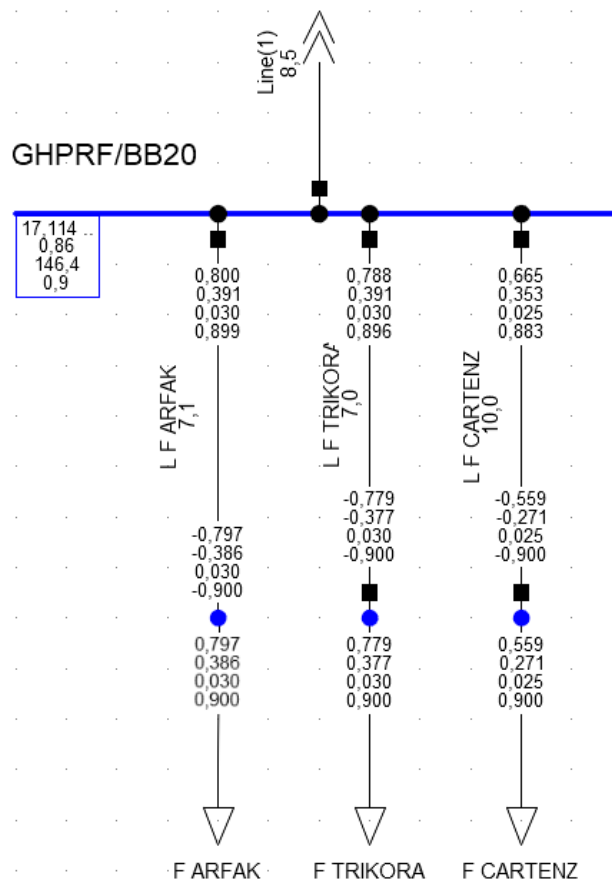
Energi Listrik merupakan sebuah kebutuhan pokok bagi kehidupan seluruh masyarakat mulai dari kebutuhan listrik untuk rumah tangga, untuk kebutuhan rumah-rumah ibadah, kegiatan sosial, pemerintahan, perkantoran, bisnis dan perindustrian, semua membutuhkan listrik, maka dapat dipastikan semua kegiatan manusia akan lumpuh jika tidak ada listrik. Maka dari itu PT PLN (Persero) sebagai perusahaan penyedia energi listrik harus dapat menjaga kualitas tegangan yang disalurkan ke seluruh pelanggan agar energi listrik yang dimanfaatkan oleh pelanggan merupakan kualitas tegangan yang baik dan sesuai standart. Hal ini juga sesuai dengan Undang-Undang Nomor 30 tahun 2009 pasal 28 tentang ketenagalistrikan, bahwa badan usaha penyedia tenaga listrik wajib menyediakan kualitas kehandalan dan mutu tenaga listrik yang terbaik untuk pelayanan ke pelanggan atau masyarakat. Melihat hal tersebut, salah satu mutu tenaga listrik yang perlu dijaga adalah mutu tegangan, maka kualitas mutu tegangan sangat penting untuk dijaga dan diperhatikan tidak diperbolehkan mutu tegangan terlalu rendah.

Rendahnya kualitas tegangan yang sampai kepada konsumen atau pelanggan, dalam hal ini tegangan yang diterima peralatan elektronik apabila jauh dari batas standar yang diijinkan maka akan berakibat pada tidak optimal beroperasinya peralatan tersebut hingga potensi terburuknya adalah rusaknya peralatan elektronik tersebut, karena tegangan yang terlalu kecil mengakibatkan arus yang mengalir terlalu besar sehingga potensi terjadinya pemanasan berlebih pada komponen listrik tersebut dan mengalami kerusakan permanen.

Untuk standart jatuh tegangan yang diperbolehkan adalah sesuai standart SPLN 56-2:1994 Pasal 4 yaitu Tegangan terendah yang diizinkan adalah -5%, dan juga sesuai standart SPLN 72 Tahun 1987 Pasal 4 Ayat 19 yaitu turun tegangan TM yang diperbolehkan adalah 5%. Jika nominal tegangan kerja TM adalah 20.000 Volt maka nilai penurunan tegangan yang diizinkan sesuai standart 5% adalah turun sebesar 1000 volt sehingga tegangan kerja TM yang diperbolehkan penurunan menjadi sampai 19.000 Volt.

Terjadi kondisi yang tidak ideal pada Pangkal Penyulang Cartenz di Gardu Hubung PLN ULP Prafi dengan aset penyulang yang relatif panjang yaitu 118,74 km dengan

tegangan incomingnya yaitu sebesar 17,671 KV jika disimulasikan pada Digsilent seperti pada gambar berikut :



Gambar 1. 1 Tegangan Penyulang Cartenz di GH Prafi Load Flow Digsilent

Jika dilihat juga pada tampilan KWH Meter di Penyulang Cartenz GH Prafi nilai tegangan yang terukur adalah sebesar rata-rata 17,8 KV seperti pada gambar berikut :



Gambar 1. 2 Tegangan Penyulang Cartenz di GH Prafi Pada KWH Meter AMR

Jika dipangkal Penyulang Cartenz saja kita sudah mendapati nilai tegangannya sudah rendah, maka kondisi tegangan di ujung jaringan penyulang Cartenz potensi juga semakin rendah, ditambah dengan kondisi penyulang Cartenz dengan aset yang relatif cukup panjang dan ditambah dengan penghantar yang digunakan tidak terlalu besar yaitu mendominasi penampang ukurang 70mm².

Dan juga kondisi tidak ideal lainnya adalah nilai rugi daya yang terjadi pada penyulang Cartenz adalah sebesar 0,19 MW dari kondisi eksisting yang disimulasikan menggunakan Digsilent, ditunjukkan seperti pada gambar berikut :

		DigSILENT	Project:
		PowerFactory	
		2021 SP2	Date: 08/03/2026
Load Flow Calculation		Area Summary	
AC Load Flow, balanced, positive sequence	No	Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic tap adjustment of transformers	Yes	Max. Acceptable Load Flow Error	1,00 kVA
Consider reactive power limits		Bus Equations (HV)	0,10 %
		Model Equations	
Area: Cartenz		Study Case: Grid Manokwari	Annex: / 1
Generation	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA
External Infeed	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA
Inter Area Flow	= -0,19 MW	-0,21 Mvar	
Load P (U)	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA
Load P (Un)	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA
Load P (Un-U)	= 0,00 MW	0,00 Mvar	
Motor Load	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA
Grid Losses	= 0,19 MW	0,21 Mvar	
Line Charging	=	0,00 Mvar	
Compensation ind.	=	0,00 Mvar	
Compensation cap.	=	0,00 Mvar	
Installed Capacity	= 0,00 MW		
Spinning Reserve	= 0,00 MW		
Total Power Factor:			
Generation	= 0,00 [-]		
Load/Motor	= 0,00 / 0,00 [-]		

Gambar 1. 3 Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz Pada Digsilent

Jika dilihat nilai tegangan pada pangkal penyulang Cartenz adalah sebesar 17,8 KV maka nilai tersebut tidak sesuai standart yang diizinkan dan tentunya nilai tegangan di ujung Penyulang Cartenz berpotensi lebih sangat kecil dan semakin jauh dari standart. Kondisi ini juga berpengaruh pada mutu kualitas tegangan layanan kepada pelanggan yang relatif sangat kecil yang dapat mengganggu pelayanan kepada pelanggan.

Selain kondisi tegangan yang rendah dapat mengganggu pelayanan kepada pelanggan, kondisi ini juga akan menyebabkan rugi daya pada jaringan Distribusi akan semakin tinggi karena arus berbanding terbalik dengan tegangan. Rugi daya (P) adalah kuadrat dari arus (I^2R) sedangkan untuk menentukan nilai daya pemakaian adalah dengan

rumus $P = V \times I \times \cos \theta$, jika dilihat bahwa dengan nilai daya yang sama jika tegangan dinaikkan maka nilai arus akan kecil.

Semakin besarnya nilai rugi daya pada jaringan tentunya juga akan semakin membuat kerugian pada perusahaan penyedia tenaga listrik, karena daya yang dibangkitkan akan semakin kecil dimanfaatkan oleh pelanggan sehingga penjualan akan semakin kecil.

Dari kondisi tersebut diatas, tentunya akan mengganggu performa kinerja dari PLN ULP Prafi mulai dari buruknya pelayanan kepada pelanggan karena mutu kualitas tegangan pelayanan yang tidak standart sehingga peralatan elektronik tidak optimal beroperasi hingga terjadi kerusakan dan juga selain itu potensi terjadi kerugian pendapatan perusahaan karena dari daya yang dibangkitkan terdapat rugi daya (*losses*) yang tidak dapat tersalurkan atau tidak dimanfaatkan untuk pemakaian kebutuhan pelanggan sehingga tidak masuk sebagai penjualan energi dan pendapatan perusahaan.

1.2 Rumusan Masalah

Dari kondisi latar belakang yang sudah dijelaskan pada poin diatas, dapat diketahui bahwa di PLN ULP Prafi terdapat Penyulang Cartenz dalam kondisi yang tidak ideal operasionalnya yang berdampak pada buruknya tingkat pelayanan kepada pelanggan dan juga dapat merugikan perusahaan. Sehingga pada penelitian ini dilaksanakan project pemasangan Tranformator Auto Voltage Regulator (*AVR*) pada Jaringan Sistem Distribusi 20KV yang akan disimulasikan menggunakan Digsilent dengan rumusan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana metode perbaikan tegangan dan rugi daya pada Digsilent Penyulang Cartenz?
2. Berapa nilai tegangan Pangkal sebelum dan sesudah dipasang Trafo AVR dengan simulasi menggunakan Digsilent?
3. Berapa nilai rugi daya Penyulang Cartenz sebelum dan sesudah dipasang Trafo AVR dengan simulasi menggunakan Digsilent?
4. Bagaimana dan berapa dampak Tekno Ekonomi dari dipasangnya Trafo AVR untuk memperbaiki kualitas tegangan dan rugi daya pada Penyulang Cartenz?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini diantaranya adalah :

1. Menganalisa cara untuk melakukan perbaikan tegangan dan rugi daya pada Penyulang Cartenz menggunakan Software Digsilent
2. Menganalisa nilai tegangan pangkal sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR pada Software Digsilent
3. Menganalisa nilai rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR pada Software Digsilent
4. Menganalisa dan mengetahui dampak Tekno Ekonomi dari project pemasangan Trafo AVR pada penyulang Cartenz

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini diantaranya adalah :

1. Untuk mengetahui cara perbaikan tegangan pangkal dan rugi daya suatu Penyulang pada Digsilent jika dilakukan dengan metode pemasangan Trafo AVR apakah bisa efektif
2. Untuk menganalisa dampak Tekno Ekonomi dengan pemasangan Trafo AVR mulai dari berapa kerugian KWH dan rupiah yang ditimbulkan akibat drop tegangan dan rugi daya, biaya investasinya pemasangan Trafo AVR, serta berapa keuntungan yang didapatkan dari pemasangan Trafo AVR

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Penelitian dilakukan pada Penyulang Cartenz di Gardu Hubung Prafi PLN ULP Prafi
2. Parameter yang dilakukan penelitian adalah nilai tegangan pangkal dan rugi daya Penyulang Cartenz
3. Dilakukan analisa dampak Tekno Ekonomi dilihat dari berapa kwh dan rupiah yang ditimbulkan akibat *drop* tegangan, rugi daya, kemudian berapa nilai investasi yang dibutuhkan untuk membangun sebuah Trafo AVR dan berapa lama estimasi nilai investasi kembali setelah dilakukan perbaikan

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini secara garis besar dibagi kedalam lima bab, dimana setiap bab dibagi menjadi sub-sub bab berisi uraian yang mendukung isi secara sistematis dari setiap bab secara keseluruhan. Adapun sistematika tesis ini adalah :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan secara umum materi-materi yang akan dibahas, yaitu: latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, asumsi penelitian serta sistematika penulisan tesis.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini membahas mengenai landasan teori yang berhubungan dengan penelitian, penelitian terdahulu, kerangka pemikiran dan hipotesis penelitian.

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini diuraikan tentang metode penelitian yang terdiri dari rancangan penelitian, identifikasi variabel, definisi operasional dan pengukuran variabel, populasi sampel, dan teknik pengambilan sampel, dan metode pengumpulan data.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini diuraikan hasil penelitian yang sudah dilakukan disertai dengan analisa dan pembahasan dari temuan yang terjadi selama penelitian berlangsung.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan kesimpulan dari hasil penelitian dan saran yang diberikan untuk tempat dimana penelitian berlangsung.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Terdapat beberapa penelitian yang relevan yang telah dilakukan sebelumnya oleh penelitian lain yang dapat dijadikan acuan dan referensi, diantaranya adalah :

“Studi Pemasangan Step Voltage Regulator dengan Model Injeksi Daya pada Jaringan Menengah 20 KV Penyulang Katu Gardu Induk Menggala.” Penyulang Katu GI Menggala PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung memiliki panjang saluran sekitar 158 km dengan maksimum beban yang terukur dari GI Menggala sekitar 4,6 MW dan terdiri dari 119 Bus. Kondisi ini mengakibatkan penyulang ini mengalami profil tegangan yang melanggar ketentuan $\pm 5\%$ sebagaimana yang dinyatakan dalam Aturan Penyambungan atau *Grid Code*. Untuk memperbaiki kondisi ini, salah satunya adalah dengan pemasangan *step voltage regulator*. Dalam penelitian ini, SVR dimodelkan sebagai injeksi daya yang kemudian dikombinasikan dengan persamaan aliran daya. SVR yang dijadikan obyek dalam penelitian ini adalah dari Type B dimana pemasangan SVR Type B dipasang di dekat sumber. Metode analisa aliran daya yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode Newton-Raphson. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan tegangan akibat kontrol yang dilakukan oleh SVR. Sebelum pemasangan SVR, tegangan pada Bus 5 Penyulang Katu adalah 16,9828 kV. Setelah pemasangan SVR, terdapat peningkatan sebesar 1,3837 kV sehingga menjadi 18,3665 kV. Namun demikian, pemasangan SVR saja belum dapat memperbaiki profil tegangan secara keseluruhan akibat terlalu jauhnya drop tegangan di Penyulang Katu ini. Sehingga posisi tap maksimum SVR tidak mampu mengkompensasi tegangan yang jauh di bawah 0.95 p.u. yang terjadi di Penyulang Katu. Hasil perhitungan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak yang dikembangkan sendiri dan dibandingkan dengan perangkat lunak komersil yaitu ETAP. Selisih hasil perhitungan berada dalam kisaran 0.0108% (Sandi Daniel dkk, 2016).

“Studi Perencanaan Pembangunan Penyulang Baru Untuk Pembagian Beban Penyulang Sahang 1 Dan Raya 17 Pt Pln (Persero) ULP Siantan.” Kebutuhan akan energi listrik yang semakin meningkat membuat PT PLN (Persero) selaku penyedia tenaga listrik harus bisa memenuhi kebutuhan pelanggan dan harus menjaga kehandalan serta kontinuitas suplai energi listrik. Penelitian ini mengenai kondisi penyulang Sahang 1 dan Raya 17 pada PLN ULP Siantan UP3 Pontianak memiliki pembebanan yang berat dan panjangnya penyulang membuat drop tegangan dan susut kWh yang hilang semakin besar. Adanya penambahan daya pada pelanggan industri yang disuplai dari penyulang Raya 17 serta pengembangan dibidang pemerintahan di daerah Sui Ambawang Siantan membuat PLN sebagai penyedia satu-satunya dalam bidang kelistrikan harus mampu melayani pelanggan dengan baik.

Untuk mengatasi masalah tersebut dibuat perencanaan mengenai penambahan penyulang baru dengan dibangun gardu hubung (GH) untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas pelayanan listrik di ULP Siantan. Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi menggunakan software Etap 12.6 didapat hasil drop tegangan yang awalnya 14% menjadi dibawah 5% dan susut kWh yang awalnya 18% menjadi dibawah 5% untuk setiap penyulang yang telah dilakukan pembagian beban. Biaya investasi yang dikeluarkan untuk pembangunan penyulang baru dengan GH sebesar 42 milyar dengan pay back period (PP) atau pengembalian modal selama 1,62 tahun dan provitability index (PI) atau perhitungan keuntungan proyek adalah 4 kali selama 25 tahun masa proyek (Saadah Ayati, 2019).

“Perbaikan Jatuh Tegangan Dengan Pemasangan Automatic Voltage Regulator.” Pada jaringan distribusi telah dipertimbangkan kemungkinan-kemungkinan terjadinya penurunan tegangan karena beban puncak akibat penambahan beban dan pelepasan beban disisi konsumen.

Dengan adanya variasi beban, maka disisi konsumen pada saat tertentu akan terjadi variasi tegangan yang besarnya berada antara tegangan minimum dan tegangan maksimum. Untuk mengatasi masalah ini, dapat dilakukan dengan pemasangan kapasitor shunt atau pemasangan Automatic Voltage Regulator (AVR). Adapun titik-titik beban tempat pemasangan kapasitor shunt adalah gardu hubung Painan sebesar 600 kVAR. Dengan pemasangan kapasitor ini profil tegangan di titik beban untuk gardu hubung Painan ke Balai Selasa mengalami kenaikan tetapi belum memenuhi sesuai dengan yang diharapkan karena masih adanya rugi-rugi tegangan gardu hubung Surantih dan Balai Selasa. Oleh karena itu

dilakukan pemasangan Automatic Voltage Regulator (AVR) diletakkan pada gardu hubung Painan.

Setelah pemasangan AVR didapat hasil perhitungan kenaikan tegangan pada gardu hubung Painan sebesar 20,4123 kV, Surantih sebesar 19,5916 kV dan Balai Selasa sebesar 18,6180 kV. Setelah pemasangan Automatic Voltage Regulator (AVR) dilakukan pada gardu hubung Painan telah memenuhi standard kecil dari 10% tegangan normal, artinya performansi sistem distribusi akan menjadi lebih baik dan handal (Darmana Ija).

“Perbaikan Profil Tegangan pada Feeder Harapan Baru Lima (H5) Area Samarinda untuk Pengurangan Susut Energi.” Perbaikan profil tegangan untuk pengurangan susut energi (*losses*) pada suatu sistem tenaga listrik dimaksudkan untuk meningkatkan *performance* dari sistem tersebut. Semakin baik profil tegangan pada suatu sistem, maka susut energi (*losses*) yang terjadi pada sistem tersebut akan semakin kecil. Penelitian ini bertujuan untuk perbaikan profil tegangan pada *feeder* H5 area Samarinda dalam upaya pengurangan susut energi (*losses*). Perbaikan profil tegangan ini menggunakan peralatan AVR, *bank capacitor*, dan SVC. Metode *Newton-Raphson* digunakan untuk analisis aliran daya dan metode *Genetic Algorithm* (GA) digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan dan kapasitas peralatan. Dari hasil analisis diperoleh bahwa dengan pemasangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC *drop* tegangan dapat diperbaiki serta susut energi (*losses*) dapat dikurangi (Muslimin dkk, 2013).

“Analisa Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Distribusi 20 kV Di GH Tangse ULP Beureunuen.” Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan komponen sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk menuju ke lokasi pelanggan. Bertambahnya pertumbuhan penduduk maka pengguna atau pelanggan energi listrik juga bertambah sehingga dapat berdampak terhadap drop tegangan atau jatuh tegangan yang berakibat pada kualitas daya listrik dari titik sumber ke beban mengalami penurunan tegangan. Tujuan penelitian ini yaitu melakukan analisa beban pada penyulang Kota Tangse dan penyulang Geumpang dari *incoming* SG-11. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan software E-tap untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan. Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban dari *incoming* SG-11 sebelum dilakukan perbaikan pada penyulang Kota Tangse tegangan yang didapatkan sebesar 17,96 kV dan tegangan pada penyulang Geumpang sebesar 17,93 kV. Setelah dilakukan perbaikan dengan penambahan dari *incoming* SG-14 tegangan pada penyulang mengalami peningkatan, pada

SG-11 penyulang Kota Tangse tegangan yang didapatkan sebesar 19,76 kV dan pada SG-14 penyulang Geumpang tegangan yang didapatkan sebesar 20,36 kV. Selisih tegangan yang terjadi sebesar 1,794 kV karena SG-11 hanya mampu menyuplai untuk kebutuhan penyulang Kota Tangse. Dan selisih SG-14 sebesar 2.427 kV yang digunakan untuk membantu menyuplai kebutuhan penyulang Geumpang (Subhan dkk, 2023).

“Analisa Perbaikan Jatuh Tegangan Dengan Pemasangan *Automatic Voltage Regulator* Pada Penyulang Durian 4 PT PLN Rayon Rasau Jaya.” Penyulang Durian 4 merupakan penyulang terpanjang pada PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya yaitu dengan panjang jaringan 307 Kms dan terdapat 170 unit gardu distribusi, sehingga jatuh tegangan pada saluran merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Upaya perbaikan jatuh tegangan telah dilakukan yaitu dengan pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada penyulang Durian 4 PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya. Analisa perbaikan jatuh tegangan dengan pemasangan *automatic voltage regulator* pada penyulang Durian 4 PT. PLN Rayon Rasau Jaya yaitu dengan membandingkan dampak jatuh tegangan dan rugi-rugi daya aktif tanpa dan dengan pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada penyulang Durian 4 PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya. Hasil perhitungan persentase jatuh tegangan pada penyulang Durian 4 PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya tanpa pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Keseluruhan bus yaitu 194 bus pada penyulang Durian 4 PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya mengalami jatuh tegangan dengan persentase jatuh tegangan melebihi standar yang diijinkan SPLN No. 72 tahun 1987 yaitu lebih dari 5%. Bahkan terdapat persentase jatuh tegangan bus yang mencapai 38,3807% yaitu sebesar 12,3239 kV terjadi di bus 132 (Gardu RJ 0040 KB). Sedangkan total rugi-rugi daya aktif yang terjadi pada penyulang Durian 4 PT. PLN (Persero) Rayon Rasau Jaya sebesar 947,108 kW. Lokasi pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada penyulang Durian 4 terletak dengan bus 25 (Titik 15) dengan hasil perhitungan rasio tegangan sebesar 0,818, sehingga dengan pemasangan AVR diharapkan tegangan kirim bus 25 (Titik 15) meningkat sebesar 19,2544 kV yang sebelumnya sebesar 15,7536 kV. Dampak pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menyebabkan tegangan pada bus 132 (Gardu RJ 0040 KB) meningkat menjadi sebesar 16,5556 kV. Pemasangan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) juga mereduksi besarnya rugi-rugi daya aktif pada seksi/cabang saluran yang dicatu dari yaitu bus 25, sehingga total rugi-rugi daya aktif yang terjadi pada penyulang Durian 4 berkurang sebesar 137,169 kW menjadi 809,939 kW (Maheka Sika Muhamad, 2019).

2.2 Konsep Dasar Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik secara sederhana terdiri atas Sistem Pembangkit, Sistem Transmisi dan Gardu Induk, Sistem Distribusi, dan Sistem Sambungan Pelayanan. Sistem-sistem ini saling berkaitan dan membentuk suatu sistem tenaga listrik.

Sistem distribusi adalah sistem yang berfungsi mendistribusikan tenaga listrik kepada para pemanfaat. Sistem distribusi terbagi 2 bagian :

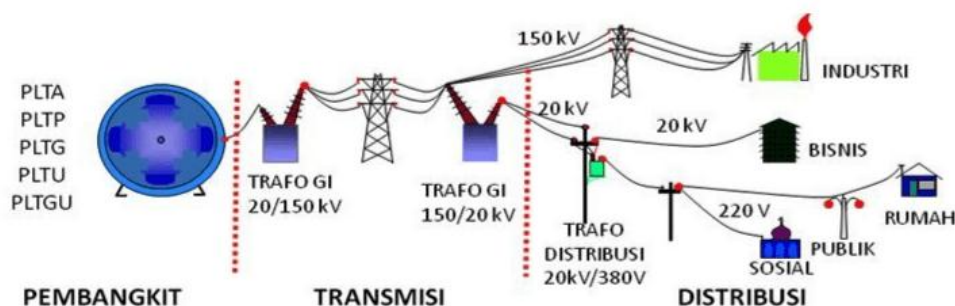
1. Sistem Distribusi Tegangan Menengah
2. Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Sistem Distribusi Tegangan Menengah mempunyai tegangan kerja diatas 1 kV dan setinggi-tingginya 35 kV. Sistem Distribusi Tegangan Rendah mempunyai tegangan kerja setinggi-tingginya 1 kV.

Jaringan distribusi Tegangan Menengah berawal dari Gardu Induk/Pusat Listrik pada sistem terpisah/isolated. Pada beberapa tempat berawal dari pembangkit listrik. Bentuk jaringan dapat berbentuk radial atau tertutup (radial open loop). Jaringan distribusi Tegangan Rendah berbentuk radial murni. Sambungan Tenaga Listrik adalah bagian paling hilir dari sistem distribusi tenaga listrik.

Pada Sambungan Tenaga Listrik tersambung Alat Pembatas dan Pengukur (APP) yang selanjutnya menyalurkan tenaga listrik kepada pemanfaat.

Konstruksi keempat sistem tersebut dapat berupa Saluran Udara atau Saluran Bawah Tanah disesuaikan dengan kebijakan manajemen, masalah kontinuitas pelayanan, jenis pelanggan, pada beban atas permintaan khusus dan masalah biaya investasi.



Gambar 2. 1 Alur Sistem Tenaga Listrik

2.3 Aspek Perencanaan Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi Tegangan Menengah saluran udara dipakai umumnya untuk daerah dengan jangkauan luas, daerah padat beban rendah atau daerah-daerah penyangga antara kota dan desa.

Biaya investasi Saluran Udara relatif murah, mudah dalam pembangunannya, mudah pada aspek pengoperasian, akan tetapi padat pemeliharaan. Tingkat kontinuitas rendah dengan konfigurasi sistem umumnya radial (Fishbone).

Jaringan distribusi Tegangan Menengah saluran bawah tanah dipakai umumnya untuk daerah padat beban tinggi (beban puncak lebih dari 2,5 MVA/km² dengan luas minimal 10 km²) dengan jangkauan terbatas. Biaya investasi mahal, sulit dalam pembangunan, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan, tingkat kontinuitas tinggi.

Pada jaringan dengan saluran bawah tanah selalu direncanakan dalam bentuk “loop” guna menghindari pemadaman (black – out) akibat gangguan. Pada sistem distribusi Tegangan Rendah dan Sambungan Tenaga Listrik digunakan konfigurasi sistem radial murni. Hanya pada pelanggan-pelanggan tertentu diberikan pasokan alternatif jika terjadi pemadaman. Konstruksi jaringan umumnya saluran udara. Pemakaian saluran bawah tanah umumnya untuk kabel daya (kabel naik, optik kabel), pada daerah-daerah eksklusif atas permintaan khusus, pada daerah-daerah bisnis khusus serta atas dasar kebijakan perencanaan otoritas setempat.

2.4 Konfigurasi Jaringan

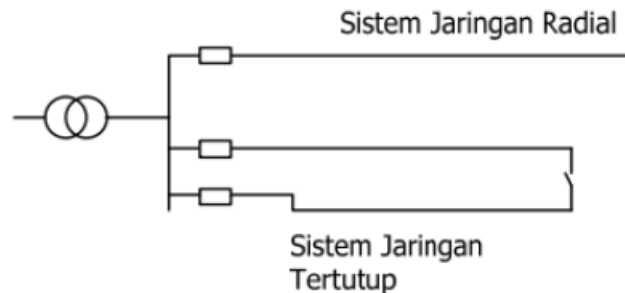
Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

A. Jaringan radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi “black-out” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

B. Jaringan Bentuk Tertutup

Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (black-out) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.

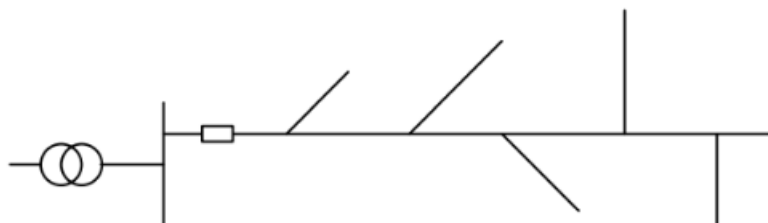


Gambar 2. 2 Konfigurasi Jaringan Distribusi Dasar

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

1. Konfigurasi Tulang Ikan (Fish-Bone)

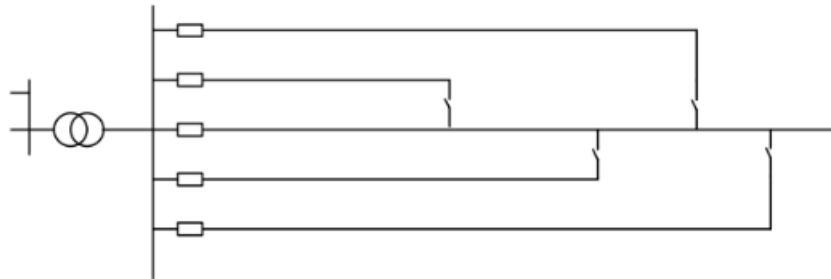
Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [Pole Top Switch (PTS), Air Break Switch (ABSW) dengan koordinasi relai atau dengan system SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (Automatic Recloser) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (Automatic Sectionalizer) pada pencabangan.



Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan Tulang Ikan (Fishbone)

2. Konfigurasi Kluster (Cluster / Leap Frog)

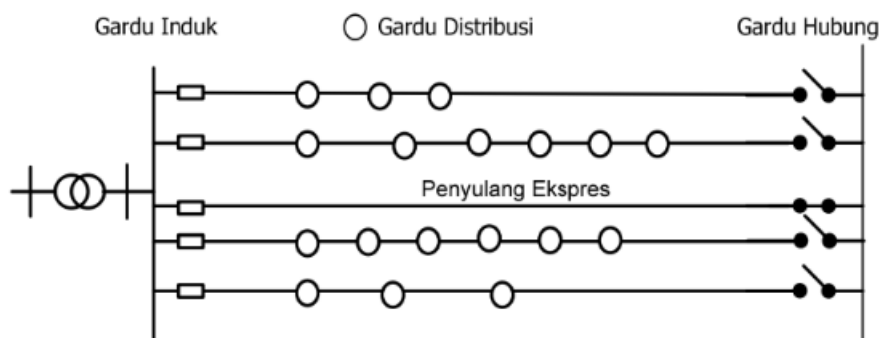
Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (Radial Open Loop). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.



Gambar 2. 4 Konfigurasi Jaringan Kluster (Leap Frog)

3. Konfigurasi Spindel (Spindle Configuration)

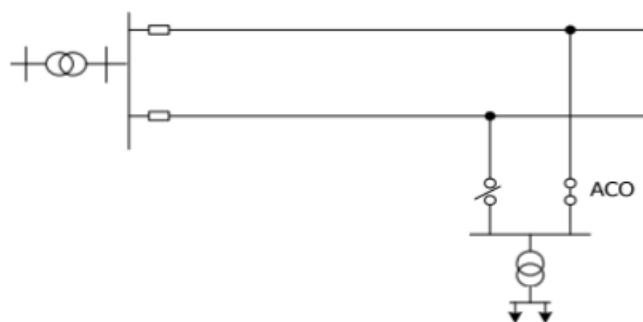
Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu pengulang cadangan (standby atau express feeder) dan penyulang operasi (working feeder). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep Spindel jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (Normally Open), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (Normally Close).



Gambar 2. 5 Konfigurasi Jaringan Spindel

4. Konfigurasi Fork

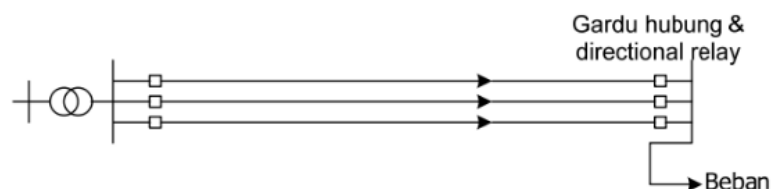
Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (Short Break Time). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas Automatic Change Over Switch (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan Tee- Off (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



Gambar 2. 6 Konfigurasi Jaringan Fork

5. Konfigurasi Spotload (Parallel Spot Configuration)

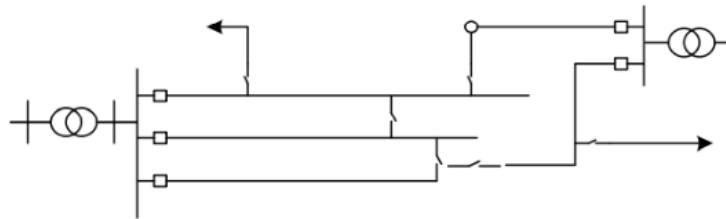
Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (Directional Relay) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 2. 7 Konfigurasi Jaringan Spotload

6. Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesh)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan- pelanggan pemakaian khusus.



Gambar 2. 8 Konfigurasi Jaringan Jala-Jala (Grid)

7. Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesh)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.

2.5 Parameter Kelistrikan

2.5.1 Arus Listrik

Arus listrik atau dalam vesi bahasa inggris sering disebut electric current dapat didefinisikan sebagai jumlah muatan listrik yang mengalir tiap satuan waktu. Biasanya arus memiliki satuan A (Ampere) atau dalam rumus terkadang ditulis I. Arus listrik merupakan gerakan kelompok partikel bermuatan listrik dalam arah tertentu. Arah arus listrik yang mengalir dalam suatu konduktor adalah dari potensial tinggi ke potensial rendah (berlawanan arah dengan gerak elektron). Satu ampere sama dengan satu coulomb dari electron melewati satu titik pada satu detik. Pada kasus ini, besarnya energi listrik yang bergerak melewati konduktor (penghantar).

Muatan listrik bisa mengalir melalui kabel atau penghantar listrik lainnya. Pada zaman dulu, Arus konvensional didefinisikan sebagai aliran muatan positif, sekalipun kita sekarang tahu bahwa arus listrik itu dihasilkan dari aliran yang bermuatan negatif ke arah yang sebaliknya.

2.5.2 Tegangan

Tegangan listrik (voltage) adalah perbedaan potensi listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik. Tegangan dinyatakan dalam suatu volt (V). Besaran ini mengukur energy potensial sebuah medan listrik untuk menyebabkan aliran listrik dalam sebuah konduktor listrik. Tergantung pada perbedaan potensi listrik satu tegangan listrik dapat dikatakan sebagai ekstra rendah, rendah, tinggi atau ekstra tinggi. Tenaga yang mendorong electron agar bisa mengalir dalam sebuah rangkaian dinamakan tegangan. Tegangan adalah sebenarnya nilai dari potensial energi anantara dua titik. Pada sebuah rangkaian, besar energi potensial yang ada untuk menggerakkan electron pada titik satu dengan titik yang lainnya merupakan jumlah tegangan.

2.5.3 Daya

Daya listrik didefinisikan sebagai kecepatan aliran energi listrik pada satu titik jaringan listrik tiap satu satuan waktu. Dengan satuan watt atau Joule per detik dalam SI, daya listrik menjadi besaran terukur adanya produksi energi listrik oleh pembangkit, maupun adanya penyerapan energi listrik oleh beban listrik. Daya semu, daya nyata, dan daya reaktif dianggap sebagian engineer sebagai sesuatu yang sulit untuk dipahami. Terutama karena sulitnya untuk mengimajinasikan daya-daya tersebut. Namun sebenarnya cukup mudah untuk memahami apa itu daya semu, daya nyata, dan daya reaktif. Hanya dibutuhkan sebuah pandangan yang lebih luas mengenai sistem jaringan listrik AC.

Pada sistem tenaga listrik terdapat perbedaan antara daya atau kekuatan (*power*) dan energi. Energi adalah daya dikalikan waktu sedangkan daya listrik merupakan hasil perkalian tegangan dan arusnya, dengan satuan daya listrik yaitu *Watt* yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (*joule/s*). Daya listrik (P) yang dihasilkan oleh arus listrik (I) pada tegangan (V) dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$P = V.I \quad (2.1)$$

Dimana :

P = daya [*watt*]

I = arus [*ampere*]

V = tegangan [*Volt*]

2.5.3.1 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang melewati suatu saluran penghantar yang ada pada jaringan transmisi maupun distribusi atau hasil penjumlahan daya aktif dan daya reaktif. Daya semu ini umumnya tertera di kWh meter. Dimana daya semu ini dibentuk oleh besaran tegangan yang dikalikan dengan besaran arus.

$$\text{Untuk 1 phasa : } S = V \times I \quad (2.2)$$

$$\text{Untuk 3 phasa : } S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.3)$$

Dimana, S = Daya Semu (VA).

2.5.3.2 Daya Aktif

Daya aktif (daya nyata) adalah daya yang dipakai untuk menggerakkan berbagai macam seperti : gerakan motor listrik atau mekanik. Daya aktif ini merupakan pembentuk dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk 1 phasa : } P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.4)$$

$$\text{Untuk 3 phasa : } P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (2.5)$$

dimana,

P = daya aktif (watt)

V = tegangan yang ada (KV)

I = besar arus yang mengalir (A)

$\cos \varphi$ = faktor kerja (standard PLN 0,85)

2.5.3.3 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang tidak terpakai dalam suatu sistem tenaga listrik. Adanya daya reaktif juga sering dipengaruhi oleh beban induktif atau kapasitif suatu rangkaian listrik.

$$\text{Untuk 1 phasa : } Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (2.6)$$

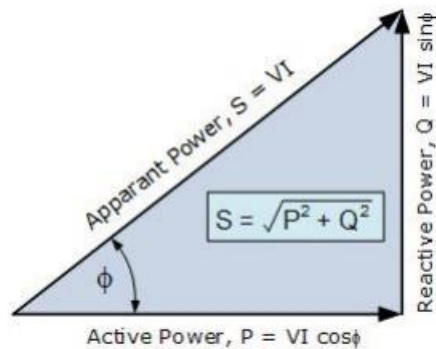
$$\text{Untuk 3 phasa : } Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \quad (2.7)$$

Dimana :

Q = daya reaktif (VAR)

$\sin \phi$ = faktor kerja (tergantung besarnya ϕ)

Dari ketiga daya diatas yaitu daya semu (S), daya aktif (P), serta daya reaktif (Q) maka hubungan untuk daya-daya tersebut dapat digambarkan dalam bentuk segitiga daya kompleks yang dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. 9 Segitiga Daya

Gambar 2.9 diatas merupakan gambar segitiga daya kompleks yang artinya menyatakan hubungan dari ketiga jenis daya tersebut yaitu : Daya semu, daya aktif dan daya reaktif. Menurut Smith (1992) konsep daya kompleks memberikan pendekan lain untuk pemecahan persoalan rangkaian arus AC

2.6 Parameter Saluran Distribusi

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu sistem tenaga listrik memiliki sifat-sifat listrik sebagai parameter saluran seperti resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Oleh karena saluran distribusi memiliki saluran yang tidak begitu jauh (kurang dari 80 km) dan menggunakan tegangan tidak lebih besar dari 70 kV maka kapasitansi dan konduktansi sangat kecil dan dapat diabaikan. Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Resistansi penghantar sangat penting dalam evaluasi eifisiensi distribusi dan studi ekonomis. Induktansi timbul dari efek medan magnet di sekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir. Parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisis sistem tenaga.

A. Resistansi Saluran

Nilai tahanan saluran transmisi dipengaruhi oleh resistivitas konduktor, suhu, dan efek kulit (skin effect). Tahanan merupakan sebab utama timbulnya susut tegangan pada saluran transmisi. Dikenal dua macam tahanan, yaitu tahanan arus searah dan tahanan arus bolak-balik. Tahanan arus searah ditentukan oleh nilai resistivitas material konduktor :

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \Omega \quad (2.8)$$

Dimana :

R_{dc} = Tahanan arus searah (Ω)

ρ = Tahanan jenis penghantar / resistivitas ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

l = Panjang penghantar saluran (m)

A = Luas penampang penghantar (mm^2)

Sedangkan menurut AS.pabla (1995) tahanan arus bolak balik dapat di peroleh dari

:

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + YS + YP) \quad (2.9)$$

Dimana :

R_{ac} = Tahanan ac (Ω)

R_{dc} = Tahanan dc (Ω)

YS = skin effect (efek kulit)

YP = proximity effect (efek sekitar)

Efek kulit atau skin effect adalah gejala pada arus bolak – balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut semakin besar ke arah permukaan kawat .Tetapi bila ditinjau dari frekuensi kerja (50 Hz) ,maka efek kulit sangat kecil dan dapat diabaikan. Efek sekitar adalah pengaruh dari kawat lain yang berbeda disamping kawat yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius konduktor kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan. Karena pengaruh diatas maka resistansi lebih baik di tentukan dari data pabrik (Manufacturers data) dengan satuan Ω/km .

B. Reaktansi Saluran

Dalam hal arus bolak-balik, medan sekeliling konduktor tidaklah konstan melainkan berubah-ubah dan berkaitan dengan konduktor itu sendiri maupun konduktor lain yang berdekatan oleh karena adanya fluks yang memiliki sifat induktansi. Untuk besarnya reaktansi sangat ditentukan oleh induktansi dari kawat dan frekuensi arus bolak-balik yaitu :

$$XL = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.10)$$

Dimana,

XL = reaktansi kawat penghantar (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

L = Induktansi kawat penghantar (Hendry)

C. Induktansi Saluran

Menurut Saadat (1999) suatu penghantar yang membawa arus menghasilkan suatu medan magnetik di sekeliling penghantar. Fluks magnetik saluran merupakan lingkaran konsentris tertutup dengan arah yang diberikan oleh kaidah tangan kanan. Dengan penunjukan ibu jari sebagai arah arus, jari tangan kanan yang melingkari titik kawat sebagai arah medan magnetik. Apabila arus berubah, fluks berubah dan suatu tegangan diinduksikan dalam rangkaian. Dengan mendefenisikan material magnetik, induktansi L merupakan rasio lingkup fluks (flux linkage) magnetik total terhadap arus.

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.11)$$

Dimana λ merupakan lingkup fluks dalam weber lilit (weber turn).

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{2\pi} \mu_0 \mu_r I \ln \frac{D-r}{r} \text{ Weber} \\ L &= \frac{\mu_0 \mu_r}{8\pi} + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{D-r}{r} \text{ Henry} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} + \{ 1 + 4 \ln \frac{D-r}{r} \} \text{ H/meter} \\ &= 10^{-7} \{ 0.5 + 2 \ln \frac{D-r}{r} \} \text{ H/meter} \\ L &= \{ 0.5 + 4.6 \log_{10} \frac{D-r}{r} \} \times 10^{-7} \text{ H/meter} \end{aligned} \quad \text{lai induktansi/phase adalah sama dengan}$$

$$(2.12)$$

Dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing – masing konduktor tersebut. Induktansi dihitung dengan konsep Geometric Means Radius (GMR). Karakteristik penghantar dapat dicari dari buku penghantar atau literature pabrik pembuat yang menyediakan nilai induktansi dari suatu penghantar dalam satuan mH/km. Pabrik pembuat penghantar menyediakan karakteristik standard penghantar dengan ukuran penghantar.

2.7 Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*)

Rugi tegangan (voltage losses) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Untuk standart jatuh tegangan yang diperbolehkan adalah sesuai standart SPLN 56-2:1994 Pasal 4 yaitu Tegangan terendah yang diizinkan adalah -5%, dan juga sesuai standart SPLN 72 Tahun 1987 Pasal 4 Ayat 19 yaitu turun tegangan TM yang diperbolehkan adalah 5%. Jika nominal tegangan kerja TM adalah 20.000 Volt maka nilai penurunan tegangan yang diizinkan sesuai standart 5% adalah turun sebesar 1000 volt sehingga tegangan kerja TM yang diperbolehkan penurunan menjadi sampai 19.000 Volt. Besarnya rugi tegangan pada saluran transmisi tersebut diukur pada titik yang paling jauh (ujung).

Adapun penyebab jatuh tegangan (drop tegangan) adalah :

- a) Jauhnya jaringan, jauhnya transformator dari gardu induk
- b) Rendahnya tegangan yang diberikan GI atau rendahnya tegangan transformator distribusi
- c) Sambungan penghantar yang tidak baik, penjumlahan saluran distribusi tidak tepat sehingga bermasalah di sisi TM dan TR
- d) Jenis penghantar dan konektor yang digunakan
- e) Arus yang dihasilkan terlalu besar

Besarnya persentase rugi-rugi tegangan didefinisikan sebagai persentase rugi-rugi tegangan pada jaringan distribusi primer dengan mengambil referensi pada tegangan pengiriman, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$\% \Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot I}{V} (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta) \times 100\% \quad (2.13)$$

Karena besar arusnya 3 phasa menjadi :

$$I_{3\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi} \quad (2.14)$$

Maka besarnya persentase kerugian jatuh tegangan dapat di tentukan dalam persamaan berikut ini :

$$\% \Delta V = \frac{P \cdot l}{V^2 \cdot \cos \phi (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi)} \times 100\% \quad (2.15)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka besar persentase rugi-rugi pada saluran distribusi dapat dihitung dengan rumus :

$$\%V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V} \times 100 \% \quad (2.16)$$

Keterangan :

V = tegangan kerja sistem (volt)

ΔV = rugi-rugi tegangan (volt)

$\% \Delta V$ = persentase rugi-rugi tegangan

P = daya nyata (watt)

S = daya semu (VA)

I = arus yang melewati saluran (ampere)

R = resistansi saluran (Ω/km)

X = reaktansi saluran (Ω/km)

l = panjang saluran (km)

$\cos \phi$ = faktor kerja

Untuk mendapatkan susut tegangan distribusi primer dengan sistem pendekatan seperti pada diagram phasor diatas yaitu dengan mengamsusikan bahwa Vs dan VR berhimpitan maka didapat persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_Z = I(R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (2.17)$$

Rugi tegangan saluran merupakan tegangan jatuh (voltage drop) sepanjang saluran dan dapat ditentukan, atau $V_Z = I_s \times Z_L$ (2.18)

Tegangan sisi penerima atau tegangan sampai ke beban merupakan tegangan sisi pengirim dikurangi tegangan jatuh saluran

$$V_R = V_s - V_z \quad (2.19)$$

Besar persentase susut tegangan pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan :

$$\%V_{\text{rugi}} = \frac{V_z}{V_s} \times 100\% \quad (2.20)$$

2.8 Rugi Daya Jaringan

Rugi daya jaringan timbul oleh karena adanya komponen resistansi dan reaktansi saluran dalam bentuk rugi daya aktif dan reaktif. Rugi daya aktif yang timbul pada komponen resistansi saluran distribusi akan terdisipasi dalam bentuk energi. Sedangkan rugi daya reaktif akan dikembalikan ke sistem dalam bentuk medan magnetik dan atau medan listrik. Arus yang mengalir pada saluran akan menghasilkan rugi daya terlihat saluran.

A. Rugi Daya Aktif

Untuk menentukan besaran dari rugi-rugi daya aktif dengan melihat arus (I) dan resistansi jaringan (R) yang menjadi representasi dari jarak saluran. Sehingga besaran arus dan resistansi memiliki pengaruh terbesar dalam rugi-rugi daya aktif. Berikut ini merupakan rumus persamaan dari rugi-rugi daya aktif per fasa, sebagai berikut dengan satuan watt (Ardiansyah, 2023) :

$$P_{\text{rugi-rugi}(1\emptyset)} = I^2 \cdot R \quad (2.21)$$

Sehingga untuk menghitung rugi-rugi daya aktif dengan sistem 3 fasa dapat dilihat pada persamaan berikut ini dengan satuan watt :

$$\begin{aligned} P_{\text{rugi-rugi}(3\emptyset)} &= 3 \cdot I^2 \cdot R \\ &= 3 \cdot P_{1\emptyset} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Ket :

I = Arus yang mengalir dalam jaringan (A)

R = Hambatan dalam penghantar (ohm)

B. Rugi Daya Reaktif

Berbeda dengan rugi-rugi daya aktif, untuk menentukan besaran rugi-rugi daya reaktif dapat ditentukan dengan menghitung arus (I^2) dan reaktansi jaringan (X) yang merupakan representasi jarak saluran. Berdasarkan definisi tersebut dapat diartikan bahwa rugi-rugi daya reaktif berpengaruh terhadap besarnya arus dan besarnya reaktansi jaringan. Berikut ini merupakan rumus persamaan dari rugi-rugi daya reaktif per fasa, sebagai berikut dengan satuan var (Ardiansyah, 2023) :

$$Q_{\text{rugi-rugi}(1\phi)} = I^2.X \quad (2.23)$$

Sehingga untuk menghitung rugi-rugi daya aktif dengan sistem 3 fasa dapat dilihat pada persamaan berikut ini dengan satuan var :

$$\begin{aligned} Q_{\text{rugi-rugi}(3\phi)} &= 3.I^2.X \\ &= 3.Q_{1\phi} \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.9 Digsilent Power Factory

Program perhitungan DIgSILENT PowerFactory, adalah *software* rekayasa yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIgSILENT Nama singkatan dari “*Digital SimuLation and Electrical NeTwork calculation program*”. DIgSILENT adalah perangkat lunak analisis sistem tenaga yang pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antar muka satu baris, diagram satu baris interaktif, juga termasuk fungsi menggambar, kemampuan mengedit dan semua relevan statis dan dinamis fitur perhitungan.

DIgSILENT PowerFactory dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas dan programmer dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah

besar dan diimplementasi oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga.

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

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

Dengan menggunakan hanya satu database, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data busbar, Data Generator, data proteksi, harmonik data, data *controller*), PowerFactory dapat dengan mudah mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Beberapa fungsi yang tersedia dalam DIgSILENT PowerFactory adalah analisis aliran beban/*loadflow analysis*, perhitungan arus pendek/*short-circuit calculation*, analisis harmonik/*harmonic analysis*, koordinasi proteksi/*protection coordination*, perhitungan stabilitas/*stability calculation* dan analisis modal/*modal analysis* (Zenny Jaelani, 2013).

2.10 Analisa Tekno Ekonomi

Ekonomi Teknik pada dasarnya adalah suatu ilmu pengetahuan yang menjelaskan bagaimana metode menilai suatu desain teknis direncanakan juga layak ekonomis/menguntungkan untuk direalisasikan.

Kegiatan investasi merupakan kegiatan penting yang memerlukan biaya besar dan berdampak jangka panjang terhadap kelanjutan usaha. Oleh karena itu, analisis yang sistematis dan rasional sangat dibutuhkan sebelum kegiatan itu direalisasikan. Pertanyaan yang paling penting diajukan sebelum keputusan diambil adalah sebagai berikut.

1. Apakah investasi tersebut akan memberikan manfaat ekonomis terhadap perusahaan?
2. Apakah investasi yang dimaksud sudah merupakan pilihan yang optimal dari berbagai kemungkinan yang ada?

Untuk menjawab pertanyaan pertama diperlukan analisis evaluasi investasi yang bisa menjelaskan apakah kegiatan investasi tersebut akan menjanjikan suatu keuntungan (profit) dalam jangka panjang atau tidak. Sementara itu, untuk menjelaskan apakah pilihan yang akan diambil sudah merupakan pilihan yang terbaik dari alternatif yang tersedia, perlu dilakukan analisis pemilihan alternatif.

Suatu investasi merupakan kegiatan menanamkan modal jangka panjang, di mana selain investasi tersebut perlu pula disadari dari awal bahwa investasi akan diikuti oleh sejumlah pengeluaran lain yang secara periodik perlu disiapkan. Pengeluaran tersebut terdiri dari biaya operasional (operation cost), biaya perawatan (maintenance cost), dan biaya-biaya lainnya yang tidak dapat dihindarkan. Di samping pengeluaran, investasi akan menghasilkan sejumlah keuntungan atau manfaat, mungkin dalam bentuk penjualan-penjualan produk benda atau jasa atau penyewaan fasilitas.

Terdapat berbagai metode dalam mengevaluasi kelayakan investasi dan yang umum dipakai, yaitu :

- a. Metode Net Present Value (NPV)
- b. Metode Annual Equivalent (AE)
- c. Metode Internal Rate of Return (IRR)
- d. Metode Benefit Cost Ratio (BCR)
- e. Metode Payback Period (PBP)

Pada dasarnya semua metode tersebut konsisten satu sama lain, artinya jika dievaluasi dengan metode NPV dan metode lainnya akan menghasilkan rekomendasi yang sama, tetapi informasi spesifik yang dihasilkan tentu akan berbeda. Oleh karena itu, dalam praktiknya masing-masing metode sering dipergunakan secara bersamaan dalam rangka mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif terhadap perilaku investasi tersebut.

2.10.1 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) adalah suatu metode ekonomi teknik yang digunakan untuk menghitung selisih antara nilai investasi dengan nilai kas bersih di masa mendatang. Diperlukan menentukan tingkat bunga yang relevan guna menghitung nilai kas sekarang. Jika selisih nilai kas bersih di masa mendatang dengan nilai investasi sekarang bernilai positif, maka dapat diartikan bahwa proyek menguntungkan karena nilai kas bersih lebih tinggi dibanding biaya investasi sehingga proyek dinyatakan layak. Begitupun sebaliknya jika hasil NPV mempunyai nilai kas penerimaan yang lebih rendah dari nilai investasi maka proyek tersebut tidak menguntungkan. Menghitung NPV dapat dilakukan dengan rumus berikut :

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1-i)^t} - II \quad (2.25)$$

Dimana:

NCF_t = *Net Cash Flow* periode tahun

II = Investasi awal (*Initial Investment*)

i = Tingkat diskonto

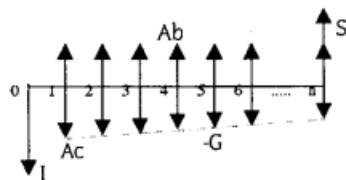
n = Periode dalam tahun (umur investasi)

Pengambilan keputusan layak atau tidaknya suatu investasi dengan metode NPV dapat dilihat dari kriteria sebagai berikut :

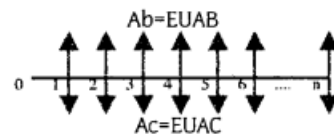
- Apabila NPV bernilai positif, maka proyek tersebut dapat dinyatakan layak untuk dilaksanakan karena hasil positif tersebut menunjukkan bahwa perhitungan investasi tersebut telah dapat mencapai kondisi yang menguntungkan sampai dengan periode yang diperhitungkan.
- Apabila NPV bernilai negatif, maka proyek tersebut dapat dinyatakan tidak layak untuk dilaksanakan karena nilai negatif menunjukkan bahwa perhitungan investasi belum dapat mencapai kondisi yang dapat menguntungkan.

2.10.2 Annual Equivalent (AE)

Metode annual ekuivalen konsepnya merupakan kebalikan dari metode NPV. Jika pada metode NPV seluruh aliran cash ditarik pada posisi present, sebaliknya pada metode AE ini aliran cash justru didistribusikan secara merata pada setiap periode waktu sepanjang umur investasi, baik cash-in maupun cash-out (Gambar 2.10 dan 2.11). Gambar 2.10 memperlihatkan cash flow ril yang belum berbentuk annual, sedangkan Gambar 2.11 merupakan cash flow yang telah dimodifikasi dalam format annual tanpa mengubah nilai cash flow tersebut secara keseluruhan melalui mekanisme ekuivalensi.



Gambar 2.10 Format Non Annual



Gambar 2.11 Format Annual

Hasil pendistribusian secara merata dari cash-in menghasilkan rata-pendapatan per tahun dan disebut dengan Ekuivalen Uniform Annual of Benefit (EUAB)- Sedangkan hasil pendistribusian cash-out secara merata disebut dengan Equivalent Uniform Annual of Cost (EUAC). EUAB dikurangi EUAC disebut dengan Annual Equivalent (AE).

Berdasarkan konsep tersebut diperoleh formula umum sebagai berikut :

$$\begin{aligned} EUAB &= \sum_{t=0}^n Cb_t (FPA)_t \\ EUAC &= \sum_{t=0}^n Cc_t (FPA)_t \\ AE &= \sum_{t=0}^n Cc_t (FPA)_t \\ AE &= EUAB - EUAC \end{aligned}$$

di mana Cb = cash flow benefit

Cc = cash flow cost

Cf = cash flow utuh (benefit+cost)

FPA = faktor bunga annual

t = periode waktu n = umur investasi

Untuk mengetahui apakah rencana suatu investasi tersebut layak ekonomis atau tidak, diperlukan suatu ukuran,/kriteria tertentu, dalam metode AE, yaitu:

Jika :

$AE > 0$ artinya investasi akan menguntungkan/layak (feasible)

$AE < 0$ artinya investasi tidak menguntungkan/layak (unfeasible)

Kalau rencana investasi tersebut dinyatakan layak, maka direkomendasikan untuk dilaksanakan investasi itu. Jika ternyata tidak layak, rencana tersebut tidak direkomendasikan untuk dilanjutkan. Namun, layak atau tidaknya suatu rencana investasi belumlah keputusan akhir dari suatu program investasi, sering kali pertimbangan-pertimbangan tertentu ikut pula memengaruhi keputusan yang akan diambil.

2.10.3 Internal Rate Of Return (IRR)

IRR atau **Internal Rate of Return** adalah persentase tingkat pengembalian tahunan dari sebuah investasi atau proyek bisnis. Metrik ini menghitung suku bunga yang membuat nilai sekarang bersih atau NPV (Net Present Value) dari seluruh arus kas di masa depan sama dengan nol. Suatu proyek biasanya dianggap layak jika nilai IRR lebih tinggi daripada tingkat biaya modal atau target pengembalian yang disyaratkan perusahaan (biasanya disebut *discount rate* atau suku bunga acuan).

Pada metode Internal Rate of Return (IRR) ini yang akan dicari adalah suku bunganya di saat NPV sama dengan nol. Jadi, pada metode IRR ini informasi yang dihasilkan berkaitan dengan tingkat kemampuan cash flow dalam mengembalikan investasi yang dijelaskan dalam bentuk Vo /periode waktu. Logika sederhananya menjelaskan seberapa kemampuan cash flow dalam mengembalikan modalnya dan seberapa besar pula kewajiban yang harus dipenuhi. Kemampuan inilah yang disebut dengan Internal Rate of Return (IRR), sedangkan kewajiban disebut dengan Minimum Attractive Rate of Return (MARR). Dengan demikian, suatu rencana investasi akan dikatakan layak menguntungkan jika: $IRR > MARR$.

Nilai MARR umumnya ditetapkan secara subjektif melalui suatu pertimbangan-pertimbangan tertentu dari investasi tersebut. Di mana pertimbangan yang dimaksud adalah :

- suku bunga investasi (i);
- biaya lain yang harus dikeluarkan untuk mendapatkan investasi (C_c);

- faktor risiko investasi (cr).

Dengan demikian, $MARR = i + Cc$ jika Cc dan t tidak ada atau nol, maka $MARR : i$ (suku bunga), sehingga $MARR > i.v$.

2.10.4 Benefit Cost Ratio (BCR)

Metode benefit cost ratio (BCR) adalah salah satu metode yang sering digunakan dalam tahap-tahap evaluasi awal perencanaan investasi atau sebagai analisis tambahan dalam rangka memvalidasi hasil evaluasi yang telah dilakukan dengan metode lainnya. Di samping itu, metode ini sangat baik dilakukan dalam rangka mengevaluasi proyek-proyek pemerintah yang berdampak langsung pada masyarakat banyak (Public government project), dampak yang dimaksud baik yang bersifat positif maupun yang negatif. Metode BCR ini memberikan penekanan terhadap nilai perbandingan antara aspek manfaat (benefit) yang akan diperoleh dengan aspek biaya dan kerugian yang akan ditanggung (cost) dengan adanya investasi tersebut.

Aspek benefit dan cost dalam proyek-proyek pemerintah mempunyai pengertian yang lebih luas daripada pengertian biasa, di mana benefit dan cost itu sendiri sering kali ditemukan dalam bentuk manfaat maupun biaya tidak langsung yang diperoleh pemerintah atau masyarakat. Contohnya investasi terhadap pembukaan jalan baru, pembangunan pasal terminal, pelabuhan, bendungan, waduk, pertamanan, komplek wisata, rumah sakit, rumah ibadah, sekolah, dan sebagainya. Sebagai contoh, pembangunan jalan baru yang melalui suatu daerah tertentu, benefit langsungnya pada masyarakat tentu tidak hanya efisiensi perjalanan, tetapi juga akan menghasilkan manfaat turutan lain seperti peningkatan produktivitas lahan di sekitar jalan tersebut, peningkatan pertumbuhan ekonomi masyarakat, dan sebagainya. Begitu pula dengan biaya yang timbul akibat dibangunnya jalan tersebut juga bukan hanya biaya langsung seperti investasi yang dikeluarkan untuk membangun fisik jalan, tetapi akan muncul pula biaya lain yang harus dikeluarkan masyarakat yang disebut dengan disbenefit, yaitu dampak negatif dari investasi seperti biaya terhadap dampak perubahan lingkungan, meningkatnya kecelakaan, menurunnya keamanan dan kenyamanan masyarakat sekitar, intrusi nilai-nilai budaya sosial yang tidak menguntungkan, dan sebagainya.

Adapun metode analisis benefit cost ratio (BCR) ini akan dijelaskan sebagai berikut :

$$\text{Rumus umum } BCR = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}} \quad \text{atau} \quad \frac{\sum \text{Benefit}}{\sum \text{Cost}} \quad (2.26)$$

$$\text{Jika analisis dilakukan terhadap present: } BCR = \frac{PWB}{PWC} \quad \text{atau} \quad \frac{\sum_{t=0}^n Cb_t(FBP)_t}{\sum_{t=0}^n Cc_t(FBP)_t}$$

$$\text{Jika analisis dilakukan terhadap annual: } BCR = \frac{EUAB}{EUAC} \quad \text{atau} \quad \frac{\sum_{t=0}^n Cb_t(FBA)_t}{\sum_{t=0}^n Cc_t(FBA)_t}$$

Kriteria keputusan

Untuk mengetahui apakah suatu rencana investasi layak ekonomis atau tidak setelah melalui metode ini adalah :

Jika :

$BCR \geq 1$ maka investasi layak (feasible)

$BCR < 1$ maka investasi tidak layak (unfeasible)

2.10.5 Payback Period (PBP)

Analisis Payback Period pada dasarnya bertujuan untuk mengetahui seberapa lama (periode) investasi akan dapat dikembalikan saat terjadinya kondisi pulang pokok (break even-point)'. Lamanya periode pengembalian (k) saat kondisi BEP adalah :

$$k_{(PBP)} = \sum_{t=0}^k CF_t \geq 0 \quad \text{di mana : } k = \text{periode pengembalian} \\ CF_t = \text{cash flow periode ke } t$$

jika komponen cash flow benefit dan cosr-nya bersifat annual, maka formulanya menjadi :

$$k_{(PBP)} = \frac{\text{Investasi}}{\text{Annual Benefit}} \times \text{periode waktu}$$

Kriteria keputusan

Untuk mengetahui apakah rencana suatu investasi tersebut layak ekonomis atau tidak, diperlukan suatu ukuran/kriteria tertentu. Dalam metode Payback Period ini rencana investasi dikatakan layak (feasible).

Jika $k \leq n$ dan sebaliknya.

,k = jumlah periode pengembalian

,n = umur investasi

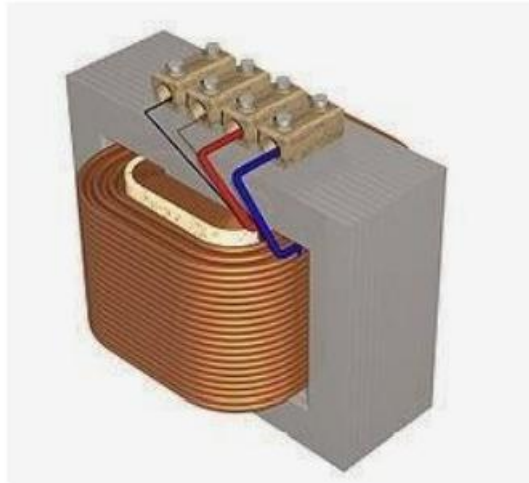
2.11 Transformator

Transformator atau lebih dikenal dengan nama “transformer” atau “trafo” sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan yang satu ke level tegangan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Selain itu, transformator juga dapat digunakan untuk sampling tegangan, sampling arus, dan juga mentransformasi impedansi. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain mensuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). Bila terdapat lebih dari dua kumparan maka kumparan tersebut akan disebut sebagai kumparan tersier, kuarter, dst.

Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan perubahan medan magnet. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan, sehingga fluks magnet yang timbulkan akan mengalir ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul ggl induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (mutual inductance). Bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaian beban) maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Jika efisiensi sempurna (100%), semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.

Bagian utama transformator adalah dua buah kumparan yang keduanya dililitkan pada sebuah inti besi lunak. Kedua kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda. Kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC disebut kumparan primer, sedangkan kumparan yang lain disebut kumparan sekunder. Jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC (dialiri arus listrik AC), besi lunak akan menjadi elektromagnet. Karena arus yang mengalir tersebut adalah arus AC, garis-garis gaya elektromagnet selalu berubah-ubah. Oleh karena itu, garis-garis gaya yang dilingkupi oleh kumparan sekunder juga berubah-ubah. Perubahan garis gaya itu menimbulkan GGL induksi pada kumparan sekunder. Hal itu

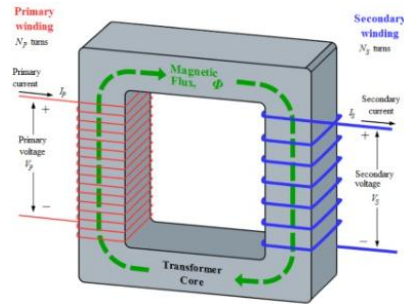
menyebabkan pada kumparan sekunder mengalir arus AC / arus induksi (Teknik Pengendalian Instrumen Logam, Jilid 2 Hal 215).



Gambar 2. 10 Transformator

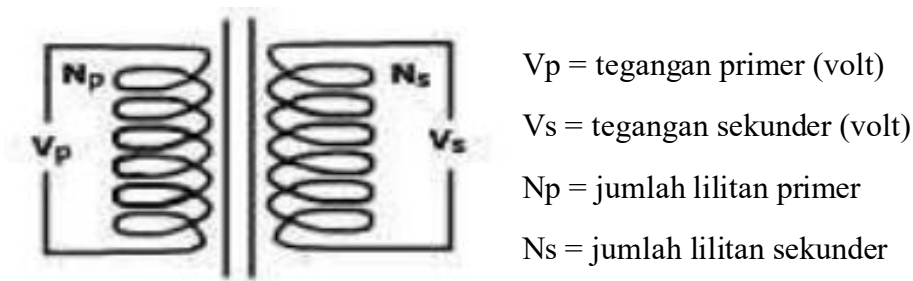
2.12 Prinsip Kerja Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis, yang dipergunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetik berlamina. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder (Teknik Pengendalian Instrumen Logam, Jilid 2 Hal 215).



Gambar 2. 11 Prinsip Kerja Transformator

Hubungan antara tegangan primer, jumlah lilitan primer, tegangan sekunder, dan jumlah lilitan sekunder, dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :



Gambar 2. 12 Hubungan Tegangan dan Lilitan Trafo

Pada gambar 2.12 menjelaskan hubungan tegangan dengan lilitan pada transformator yang apabila semakin besar tegangan listrik yang diberikan terhadap motor listrik maka putaran motor listrik tersebut semakin cepat dan juga apabila semakin besar jumlah lilitan pada motor listrik maka torsi tenaga yang dihasilkan motor listrik lebih besar tetapi kecepatannya menurun.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

V_p = tegangan primer (volt)

V_s = tegangan sekunder (volt)

N_p = jumlah lilitan primer

N_s = jumlah lilitan sekunder

Berdasarkan perbandingan antara jumlah lilitan primer dan jumlah lilitan sekunder transformator ada dua jenis yaitu :

1. Transformator step up yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik rendah menjadi tinggi, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$)
2. Transformator step down yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$).

Pada transformator (trafo) besarnya tegangan yang dikeluarkan oleh kumparan sekunder adalah :

1. Sebanding dengan banyaknya lilitan sekunder ($V_s \sim N_s$).
2. Sebanding dengan besarnya tegangan primer ($V_s \sim V_p$).
3. Berbanding terbalik dengan banyaknya lilitan primer,

$$V_s \sim \frac{1}{N_p}$$

Sehingga dapat dituliskan :

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} \times V_p$$

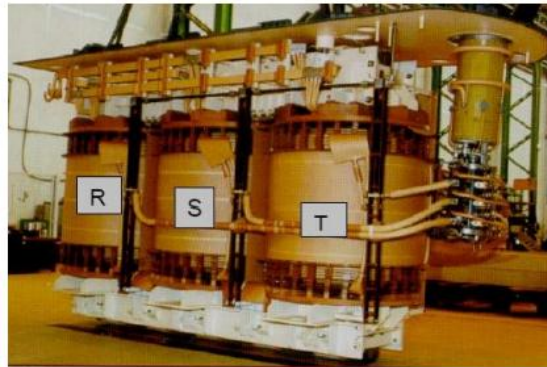
2.13 Komponen Transformator

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu. Peralatan utama transformator terdiri dari :

A. Kumparan Trafo

Kumparan trafo terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, pertinax, dll) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumparan lain. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Kadang kala transformator memiliki kumparan tertier. Kumparan tertier

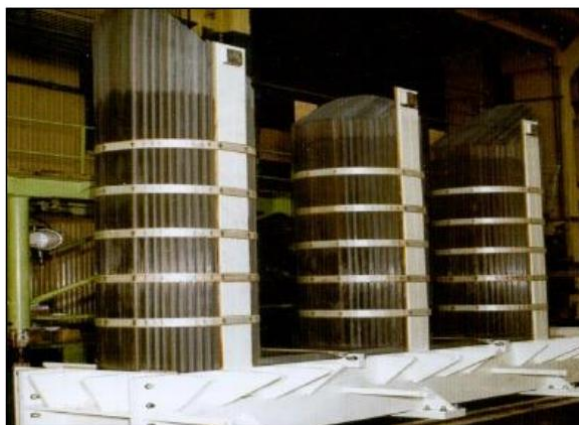
diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumparan tertier selalu dihubungkan delta. Kumparan tertier sering juga untuk dipergunakan penyambungan peralatan bantu seperti kondensator synchrone, kapasitor shunt dan reactor shunt.



Gambar 2. 13 Kumparan Transformator

B. Inti Besi

Dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini juga diberi isolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy “Eddy Current”.



Gambar 2. 14 Inti Besi Transformator

C. Minyak Trafo

Berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak-trafo. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagai minyak trafo adalah sebagai berikut :

1. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$).
2. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel inert di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat.
6. Sifat kimia yang stabil.

D. Bushing

Sebuah konduktor (porselin) yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing diselubungi dengan suatu isolator dan berfungsi sebagai konduktor tersebut dengan tangki transformator. Selain itu juga bushing juga berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki trafo.

E. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (cooling fin) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi

menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

Transformator juga memiliki komponen bantu, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. **Peralatan Pendingin** : pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa: udara/gas, minyak dan air.
2. **Tap Changer** : yaitu suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan tap (sadapan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah-ubah. Tap changer selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo pada posisi tegangan tinggi. Tap changer dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (on-load) atau dalam keadaan tak berbeban (off load), tergantung jenisnya.
3. **Peralatan Proteksi** : peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut:
 - Rele Buchholz; yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antar lilitan (dalam fasa/ antar fasa), hubung singkat antar fasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.
 - Rele tekanan lebih; peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan

gas secara tiba-tiba dan an langsung mentripkan CB pada sisi upstream-nya.

- Rele diferensial; rele yang dapat mendeteksi terhadap gangguan transformator apabila terjadi flash over antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun antar kumparan.
- Rele beban lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkit simulator yang dapat mendeteksi lilitan trafo yang kemudian apabila terjadi gangguan akan membunyikan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan PMT.
- Rele arus lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.
- Rele fluks lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekwensi.
- Rele tangki tanah; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
- Rele gangguan tanah terbatas; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah didalam daerah pengaman transformator khususnya untuk

gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele differential.

- Rele termis; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

4. **Peralatan Pernapasan (Dehydrating Breather)** ; ventilasi udara yang berupa saringan silikagel yang akan menyerap uap air. Karena pengaruh naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan trafo. Permukaan minyak trafo akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak trafo, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat hygroskopis.

5. **Indikator** ; untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut :
- indikator suhu minyak
 - indikator permukaan minyak
 - indikator sistem pendingin
 - indikator kedudukan tap.

2.14 Jenis-Jenis Transformator

A. Transformator Step Up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.

B. Transformator Step Down

Transformator Step Down adalah transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan bolak-balik (AC). Pada transformator ini, jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan kumparan sekunder. Di jaringan Distribusi, transformator atau trafo step down ini biasanya digunakan untuk mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang bisa digunakan untuk peralatan rumah tangga.

2.15 Step Voltage Regulator (SVR)

Regulator tegangan adalah perangkat yang menjaga tegangan distribusi dalam rentang tertentu dari nilai yang telah ditetapkan. Regulator tegangan digunakan oleh peralatan listrik untuk meminimalkan drop tegangan dan untuk memastikan bahwa tegangan yang tepat diberikan kepada pelanggan[4]. Jatuh tegangan adalah salah satu kendala di dalam jaringan distribusi. Untuk meminimalisir jatuh tegangan diperlukan peralatan pengatur tegangan seperti step voltage regulator. SVR berfungsi mengkompensasi jatuh tegangan dengan injeksi daya ke dalam saluran. Penggunaan step voltage regulator ditujukan untuk menaikkan kualitas tegangan dan mengurangi rugi – rugi di sepanjang saluran distribusi. Pada saluran distribusi konstruksi step voltage regulator terdiri dari 1 phasa dan 3 phasa. Penggunaan step voltage regulator berdasarkan kebutuhan di dalam saluran akan ditambahkan pada 3 phasa ataupun hanya 1 phasa. Kapasitas SVR pada 1 phasa berkisar dari 25 – 400 kVA dan untuk 3 phasa berkisar dari 500 – 2000 kVa atau lebih (Sandi, Hakim, Gusmedi, 2016). Gambar 2.13 memperlihatkan bentuk dari step voltage regulator



Gambar 2. 15 Step Voltage Regulator

A. Fungsi dan Kegunaan SVR

Step voltage regulator adalah salah satu peralatan pengatur tegangan. SVR sebuah autotransformator yang memiliki beberapa tap di dalam setiap belitan dengan fungsi mekanisme pengubah tap beban (load tap changing). Perubahan tegangan didapat dengan mengubah tap dari belitan seri pada autotransformator. Fungsi dari SVR yaitu mengkompensasi injeksi daya akibat tegangan jatuh di saluran dengan bantuan pengubah tap untuk menjadikan tegangan yang diperbantukan menjadi lebih baik. Standar step regulator sesuai dengan ketentuan $\pm 10\%$ dari batasan regulator (regulator range), terdiri dari 32 step (16 raise dan 16 lower), perubahan untuk setiap step sama dengan $5/8 \%$ dan $10/16 \%$ atau $0,125 \text{ kV} / 125 \text{ V}$ dalam tegangan nominal 20 kV (Sandi, Hakim, Gusmedi, 2016).



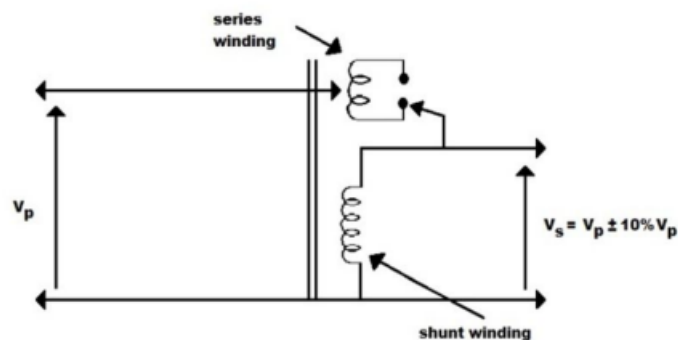
Gambar 2. 16 Indikator Posisi Tap SVR

B. Jenis Step Voltage Regulator

Salah satu produsen step voltage regulator “Cooper Power Systems” membagi SVR menjadi 2 jenis yaitu jenis A dan Jenis B. Sebagai contoh penggunaan SVR pada sistem distribusi tenaga menggunakan jenis B. Perbedaan diantara 2 jenis tersebut yaitu :

- Jenis A

Jenis A step voltage regulator adalah jenis yang digunakan pada area yang menggunakan frekuensi 60 Hz. Penggunaan jenis A bertujuan untuk mengkompensasi jatuh tegangan di bagian penerima. Di dalam setiap jenis dari step voltage regulator terdiri dari raise step dan lower step. Pada jenis A posisi dari belitan seri dan belitan shunt berada di sisi sekunder atau pada posisi penerima. Gambar 2.15 menunjukkan rangkaian SVR untuk jenis A (Sandi, Hakim, Gusmedi, 2016) :

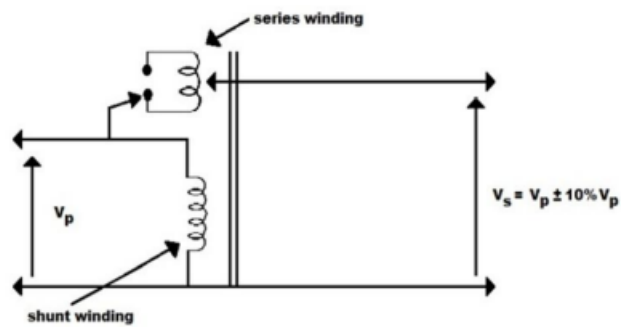


Gambar 2. 17 Step Voltage Regulator Jenis A

- Jenis B

Step voltage regulator jenis B dapat digunakan di sistem kelistrikan Indonesia dikarenakan jenis B menganut penggunaan frekuensi 50 Hz. Penggunaan jenis B ditujukan untuk mengkompensasi jatuh tegangan mendekati sumber, sehingga diharapkan kualitas tegangan yang masuk ke konsumen menjadi lebih baik. Untuk penggunaan SVR jenis B pun sama dengan jenis A yang mana terdiri dari raise step dan lower step. Gambar 2.15 menunjukkan rangkaian step voltage regulator untuk jenis B.

Dibawah ini adalah rangkaian step voltage regulator jenis B (Sandi, Hakim, Gusmedi, 2016) :



Gambar 2. 18 Step Voltage Regulator Jenis B

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

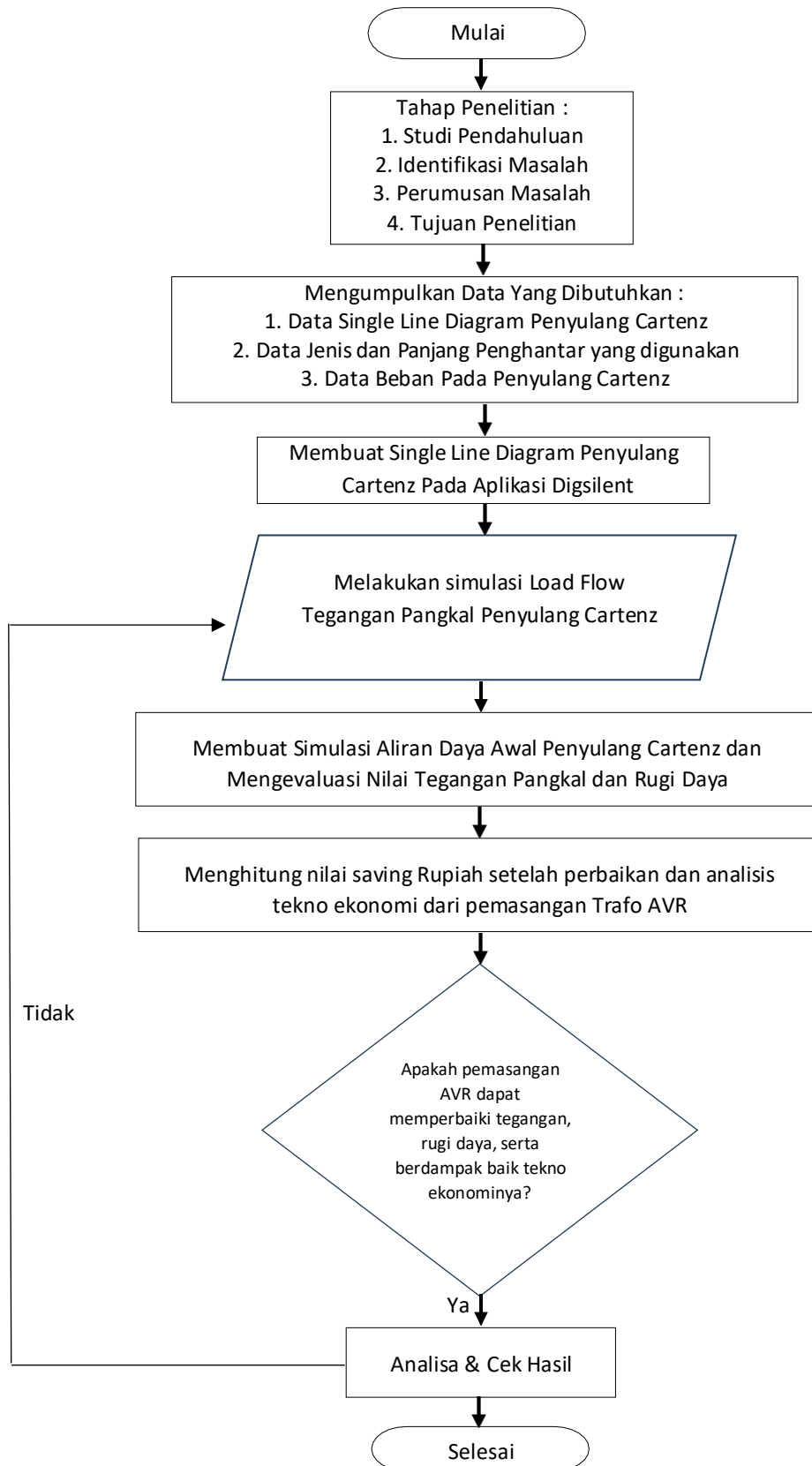
3.1 Alur dan Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini terdapat kondisi Drop Tegangan di Pangkal dan Ujung Penyulang Cartenz yaitu kurang lebih di 17,8 KV dan juga nilai Rugi Daya pada Penyulang Cartenz yaitu sebesar 0,19 MW. PLN ULP Prafi membuat project pengadaan dan pemasangan transformator Automatic Voltage Regulator (AVR) yang rencana akan dipasang untuk memperbaiki kondisi Penyulang Cartenz.

Kemudian kondisi Eksisting Penyulang Cartenz akan disimulasikan menggunakan Software Digsilent PowerFactory 2021. Simulasi dibutuhkan kelengkapan data diantaranya adalah Panjang Penyulang Cartenz, jenis penghantar yang digunakan dan luas penampang yang digunakan, jumlah beban pada penyulang Cartenz. Dengan disimulasikan akan mengetahui apakah pemasangan Trafo AVR di penyulang Cartenz pangkal dapat menyelesaikan permasalahan drop tegangan di sisi pangkal dan ujung, serta apakah berdampak pada penurunan rugi daya di Penyulang Cartenz. Data akan diambil melalui metode wawancara dan diskusi dengan tim PLN ULP Prafi.

Setelah dilakukan simulasi pada Digsilent dapat dilihat nilai tegangan dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR. Kemudian dilakukan pengumpulan data total biaya investasi untuk pengadaan dan pembangunan Trafo AVR untuk dilakukan analisa teknik ekonomi dari biaya investasi yang sudah dianggarkan, dan ditinjau berdasarkan saving yang bisa dilakukan ketika rugi daya sudah semakin kecil nilainya, berapa rupiah saving yang bisa dilakukan dengan pendekatan tarif rupiah 1444,7/kwh (TDL Per Mei 2025). Dari nilai saving tersebut dibandingkan dengan nilai total investasi dan dihitung parameter Payback Period nya berapa lama nilai investasi tersebut dapat dikembalikan dari nilai saving tersebut dan dibandingkan dengan potensi umur dari produk yang digunakan.

3.2 Desain Penelitian



Gambar 3. 1 Flowchart Metodologi Penelitian

3.3 Metode Analisis Data

Pada penelitian ini dilakukan simulasi penyulang Cartenz pada Software Digsilent dan dilakukan evaluasi terhadap kondisi tegangan Pangkal penyulang Cartenz dan juga tegangan ujung penyulang Cartenz, termasuk juga dilakukan evaluasi hasil simulasi terhadap nilai rugi-rugi daya pada Penyulang Cartenz. Pengumpulan data dibutuhkan untuk melakukan simulasi pada software Digsilent diantaranya data Single Line Diagram Sistem ULP Prafi, Panjang Penyulang Cartenz, Jenis kabel yang digunakan, ukuran penampang yang digunakan, beban penyulang Cartenz, termasuk juga data Penyulang Supply yang masuk ke GH Prafi.

Kemudian dilakukan simulasi perbaikan tegangan dan rugi daya dengan simulasi menggunakan Trafo AVR pada Digsilent, dan hasilnya dibandingkan dengan hasil pembacaan real dilapangan dan juga dilakukan perhitungan dengan menggunakan beberapa rumusan diantaranya adalah :

A. Perhitungan Jatuh Tegangan

Besarnya persentase rugi-rugi tegangan didefinisikan sebagai persentase rugi-rugi tegangan pada jaringan distribusi primer dengan mengambil referensi pada tegangan pengiriman, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$\% \Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot l}{V} (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta) \times 100\%$$

Karena besar arusnya 3 phasa menjadi :

$$I_{3\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \theta}$$

Maka besarnya persentase kerugian jatuh tegangan dapat ditentukan dalam persamaan berikut ini :

$$\% \Delta V = \frac{P \cdot l}{V^2 \cdot \cos \theta} (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta) \times 100\%$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka besar persentase rugi-rugi pada saluran distribusi dapat dihitung dengan rumus :

$$\%V_{\text{rugi}} = \frac{\Delta V}{V} \times 100 \%$$

Keterangan :

V = tegangan kerja sistem (volt)

ΔV = rugi-rugi tegangan (volt)

$\% \Delta V$ = persentase rugi-rugi tegangan

P = daya nyata (watt)

S = daya semu (VA)

I = arus yang melewati saluran (ampere)

R = resistansi saluran (Ω/km)

X = reaktansi saluran (Ω/km)

l = panjang saluran (km)

$\cos \phi$ = faktor kerja

Untuk mendapatkan susut tegangan distribusi primer dengan sistem pendekatan seperti pada diagram phasor diatas yaitu dengan mengamsusikan bahwa Vs dan VR berhimpitan maka didapat persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_z = I(R \cos \phi + X \sin \phi)$$

Rugi tegangan saluran merupakan tegangan jatuh (voltage drop) sepanjang saluran dan dapat ditentukan, atau $V_z = I_s \times Z_L$

Tegangan sisi penerima atau tegangan sampai ke beban merupakan tegangan sisi pengirim dikurangi tegangan jatuh saluran

$$V_R = V_s - V_z$$

Besar persentase susut tegangan pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan :

$$\%V_{\text{rugi}} = \frac{V_z}{V_s} \times 100\%$$

B. Perhitungan Rugi-Rugi Daya

Sehingga untuk menghitung rugi-rugi daya aktif dengan sistem 3 phasa dapat dilihat pada persamaan berikut ini dengan satuan watt :

$$\begin{aligned}P_{\text{rugi-rugi}(3\emptyset)} &= 3.I^2.R \\ &= 3.P_{1\emptyset}\end{aligned}$$

Ket :

I = Arus yang mengalir dalam jaringan (A)

R = Hambatan dalam penghantar (ohm)

C. Perhitungan Analisa Tekno Ekonomi

Dari nilai Jatuh tegangan dan rugi daya yang terjadi dan nilai setelah dilakukan perbaikan, maka dihitung nilai Saving jika rugi daya itu semakin kecil. Kemudian diambil data berapa nilai investasi yang dibutuhkan untuk membangun project Trafo AVR di PLN ULP Serui, dan akan dilakukan perhitungan nilai saving terhadap nilai investasi yang dikeluarkan butuh berapa lama (Payback Period) sampai bisa mengembalikan biaya modal investasi awal.

Kemudian dilakukan analisa berapa lama usia Trafo AVR dapat beroperasi dan dibandingkan dengan nilai Payback periodnya, apakah project ini layak atau tidak layak untuk dijalankan. Analisis dilakukan menggunakan metode NPV (Net Present Value), jika NPV bernilai positif maka project tersebut layak dilaksanakan, namun jika NPV bernilai negatif maka project tidak layak untuk dilaksanakan.

3.4 Parameter Benefit & Cost

Metode *benefit cost ratio* (BCR) merupakan metode tambahan yang digunakan untuk memvalidasi hasil evaluasi yang sudah dihitung dengan metode lainnya. Biasanya digunakan pada tahap evaluasi awal perencanaan investasi. Penekanan dalam metode ini adalah perbandingan aspek manfaat yang diperoleh dengan aspek biaya atau kerugian selama adanya investasi (Ardilla Dwi Budiarta, dkk 2021).

Rumus Umum :

$$BCR = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}}$$

Kriteria keputusan :

Pengambilan keputusan layak atau tidaknya suatu investasi dengan metode ini dapat disesuaikan melalui kriteria berikut :

Jika :

$BCR \geq 1$ maka investasi layak

$BCR \leq 1$ maka investasi tidak layak

Parameter Benefit dan Cost pada penelitian ini terdiri dari beberapa yaitu :

- Benefit :
 - Nilai Rugi Daya saat sebelum dipasang Trafo AVR
 - Nilai Rugi Daya saat sesudah dipasang Trafo AVR
 - Saving selisih rugi daya dikonversi menjadi kwh dan nilai Rupiah
 - Target nilai keuntungan saving rugi daya selama kurun waktu trafo AVR bisa beroperasi
 - Selisih penjualan kwh sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR
- Cost :
 - Biaya operasional untuk preventive maintenance

- Biaya investasi pengadaan dan pemasangan Trafo *AVR*
- Nilai kwh yang sudah dirupiahkan saat Trafo *AVR* keluar sistem untuk nilai losses yang terjadi kembali dan potensi penjualan kwh yang turun, estimasi 1 kali dalam 1 Tahun dan durasi waktu estimasi 8 jam, sehingga dalam 15 Tahun butuh durasi 120 jam

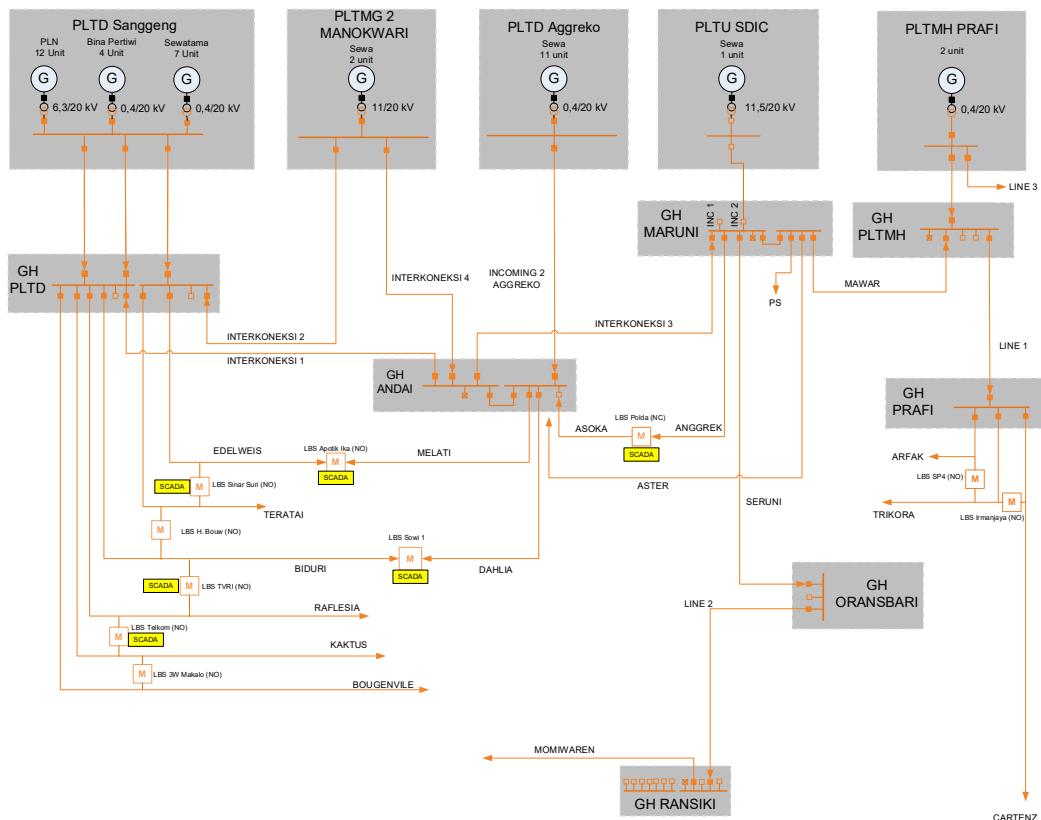
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini terdapat kondisi Drop Tegangan di Pangkal dan Ujung Penyulang Cartenz yaitu kurang lebih di 17,8 KV dan juga nilai Rugi Daya pada Penyulang Cartenz yaitu sebesar 0,19 MW. PLN ULP Prafi membuat project pengadaan dan pemasangan transformator Automatic Voltage Regulator (AVR) yang rencana akan dipasang untuk memperbaiki Penyulang Cartenz.

Berikut merupakan gambar Single Line Diagram titik GH Prafi dimana yang menjadi fokus pengamatan :



Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Manokwari-Prafi

Kemudian kondisi Eksisting Penyulang Cartenz akan disimulasikan menggunakan Software Digsilent PowerFactory 2021. Simulasi dibutuhkan kelengkapan data diantaranya adalah Panjang Penyulang Cartenz, jenis penghantar

yang digunakan dan luas penampang yang digunakan, jumlah beban pada penyulang Cartenz. Dengan disimulasikan akan mengetahui apakah pemasangan Trafo AVR di penyulang Cartenz pangkal dapat menyelesaikan permasalahan drop tegangan di sisi pangkal dan ujung, serta apakah berdampak pada penurunan rugi daya di Penyulang Cartenz. Data akan diambil melalui metode wawancara dan diskusi dengan tim PLN ULP Prafi.

Setelah dilakukan simulasi pada Digsilent dapat dilihat nilai tegangan dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR. Kemudian dilakukan pengumpulan data total biaya investasi untuk pengadaan dan pembangunan Trafo AVR untuk dilakukan analisa teknik ekonomi dari biaya investasi yang sudah dianggarkan, dan ditinjau berdasarkan saving yang bisa dilakukan ketika rugi daya sudah semakin kecil nilainya, berapa rupiah saving yang bisa dilakukan dengan pendekatan tarif rupiah 1444,7/kwh (TDL Per Mei 2025). Dari nilai saving tersebut dibandingkan dengan nilai total investasi dan dihitung parameter Payback Period nya berapa lama nilai investasi tersebut dapat dikembalikan dari nilai saving tersebut dan dibandingkan dengan potensi umur dari produk yang digunakan.

4.1 Jadwal Penelitian

Dalam mendukung agar penelitian dapat berjalan sesuai rencana mendapatkan hasil yang terbaik, serta dapat selesai tepat waktu, maka berikut merupakan timeline schedule dalam pelaksanaan penelitian :

Tabel 4.2 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Mei		Juni				Juli		Oktober				November				Desember				Januari			
		M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
1	Studi Literatur																								
2	Penyusunan Proposal																								
3	Pengumpulan Data Inputan																								
4	Pengolahan Data dan Simulasi Pada Digsilent																								
5	Pengambilan Data Lapangan Untuk Dievaluasi																								
6	Analisis Data & Hasil Simulasi																								
7	Analisa Dampak Tekno Ekonomi																								
8	Penyusunan Laporan Tesis																								

4.2 Pengumpulan Data Single Line Diagram

Pada penelitian ini terdapat 3 penyulang penting sebagai bahan pertimbangan penelitian, yaitu penyulang Mawar dan penyulang Line1 sebagai supply utama yang masuk ke Gardu Hubung (GH) Prafi, kemudian Penyulang Cartenz sebagai penyulang yang diamati ketika telah dilakukan perbaikan pada penelitian dikarenakan merupakan salah satu penyulang yang berada pada GH Prafi yang mengalami jatuh tegangan. Data yang dibutuhkan untuk melengkapi penyusunan Single Line Diagram Penyulang pada Digsilent adalah data panjang penyulang, jenis penghantar yang digunakan, beban yang dipikul oleh penyulang, berikut merupakan datanya :

Tabel 4.2 Data Penyulang Cartenz

NO	NAMA PENYULANG	SISTEM	PANJANG JTM (KMS)			
			SUTM (kms)	SKTM (kms)	SKBL (kms)	Total JTM (kms)
2	ULP PRAFI		639,89	3,26	0,00	643,15
1	Mawar	MANOKWARI	36,32	0,44		36,76
2	LINE 1	MANOKWARI	16,94	1,4		18,34
3	Arfak	MANOKWARI	35,61	0,05		35,66
4	Trikora	MANOKWARI	17,35	0,05		17,40
5	Cartenz	MANOKWARI	118,42	0,05		118,47
6	Mandala	MANOKWARI	64,97	0,05		65,02
7	Seruni	MANOKWARI	157,41	0,62		158,03

DAFTAR PERALATAN SALURAN TEGANGAN MENENGAH									
KEPRA (PERSERO) UNIT INDAK WILAYAH PAPUA DAN PAPUA BARAT									
UP3 MANOKWARI									
ULP PRAFI									
SALURAN TEGANGAN MENENGAH TERPASANG (JTM)									
No	KD SUB UNIT	NAMA SUB UNIT	ROUTE	TEGANGAN (kV)	PANJANG SIRKIT (kms)	PANJANG ROUTE (kmr)	JENIS	BAHAN	PENAMPANG (mm2)
1	42420	LINE CARTENZ		20	12,77		SUTM	AAAC	3x35 mm2
2	42420	LINE CARTENZ		20	24,90		SUTM	AAAC	3x70 mm2
3	42420	LINE CARTENZ		20	74,77		SUTM	AAACS	3x70 mm2
4	42420	LINE CARTENZ		20	5,98		SUTM	AAACS	3x150 mm2
6	42420	LINE CARTENZ		20	0,05		KABEL TANAH	NA2XSEYBY	3x150 mm2

LINE	SUBSTATION	19:00				
		LOAD (kW)	R (A)	S (A)	T (A)	AVG (A)
Interkoneksi 5	Maruni	4.570	127	130	129	129
Seruni		3.285	91	92	90	91
Mawar		475	13	12	14	13
Interkoneksi 3		6.415	179	187	182	183
Aster		481	14	13	14	14
Incoming 2 PLTU		7.174	149	150	147	149
Incoming 1 PLTU	Prafi	7.174	205	209	208	207
Cartenz		1.464	43	43	42	43
Trikora		1.566	48	48	46	47
Arfak		1.017	28	31	30	30
Mandala		897	27	26	26	26

Tabel 4.3 Data Penyulang Mawar

NO	NAMA PENYULANG	SISTEM	PANJANG JTM (KMS)			
			SUTM (kms)	SKTM (kms)	SKBL (kms)	Total JTM (kms)
2	ULP PRAFI		639,89	3,26	0,00	643,15
1	Mawar	MANOKWARI	36,32	0,44		36,76
2	LINE 1	MANOKWARI	16,94	1,4		18,34
3	Arfak	MANOKWARI	35,61	0,05		35,66
4	Trikora	MANOKWARI	17,35	0,05		17,40
5	Cartenz	MANOKWARI	118,42	0,05		118,47
6	Mandala	MANOKWARI	64,97	0,05		65,02
7	Seruni	MANOKWARI	157,41	0,62		158,03

 DAFTAR PERALATAN SALURAN TEGANGAN MENENGAH PT PLN (PERSERO) UNIT INDIK WILAYAH PAPUA DAN PAPUA BARAT UP3 MANOKWARI ULP PRAFI									
SALURAN TEGANGAN MENENGAH TERPASANG (JTM)									
No	KD SUB UNIT	NAMA SUB UNIT	ROUTE	TEGANGAN (kV)	PANJANG SIRKIT (kms)	PANJANG ROUTE (kmr)	JENIS	BAHAN	PENAMPANG (mm2)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	42420	LINE MAWAR		20	3,33		SUTM	AAAC	3x35 mm2
2	42420	LINE MAWAR		20	13,34		SUTM	AAAC	3x70 mm2
3	42420	LINE MAWAR		20	19,35		SUTM	AAACS	3x70 mm2
4	42420	LINE MAWAR		20	0,29		SUTM	AAACS	3x150mm2
5	42420	LINE MAWAR		20	0,44		KABEL TANAH	NA2XSEYBY	3x150 mm2

LINE	SUBSTATION	19:00				
		LOAD (kW)	R (A)	S (A)	T (A)	AVG (A)
Interkoneksi 5	Maruni	4.570	127	130	129	129
Seruni		3.285	91	92	90	91
Mawar		475	13	12	14	13
Interkoneksi 3		6.415	179	187	182	183
Aster		481	14	13	14	14
Incoming 2 PLTU		7.174	149	150	147	149
Incoming 1 PLTU		7.174	205	209	208	207
Cartenz	Prafi	1.464	43	43	42	43
Trikora		1.566	48	48	46	47
Arfak		1.017	28	31	30	30
Mandala		897	27	26	26	26

Tabel 4.4 Data Penyulang Line 1

NO	NAMA PENYULANG	SISTEM	PANJANG JTM (KMS)			
			SUTM (kms)	SKTM (kms)	SKBL (kms)	Total JTM (kms)
2	ULP PRAFI		639,89	3,26	0,00	643,15
1	Mawar	MANOKWARI	36,32	0,44		36,76
2	LINE 1	MANOKWARI	16,94	1,4		18,34
3	Arfak	MANOKWARI	35,61	0,05		35,66
4	Trikora	MANOKWARI	17,35	0,05		17,40
5	Cartenz	MANOKWARI	118,42	0,05		118,47
6	Mandala	MANOKWARI	64,97	0,05		65,02
7	Seruni	MANOKWARI	157,41	0,62		158,03

 DAFTAR PERALATAN SALURAN TEGANGAN MENENGAH PT PLN (PERSERO) UNIT INDIK WILAYAH PAPUA DAN PAPUA BARAT UP3 MANOKWARI ULP PRAFI									
SALURAN TEGANGAN MENENGAH TERPASANG (JTM)									
No	KD SUB UNIT	NAMA SUB UNIT	ROUTE	TEGANGAN (kV)	PANJANG SIRKIT (kms)	PANJANG ROUTE (kmr)	JENIS	BAHAN	PENAMPANG (mm2)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	42420	LINE 1		20	16,94		SUTM	AAACS	3x150 mm2
2	42420	LINE 1		20	1,40		KABEL TANAH	NA2XSEYBY	3x150 mm2

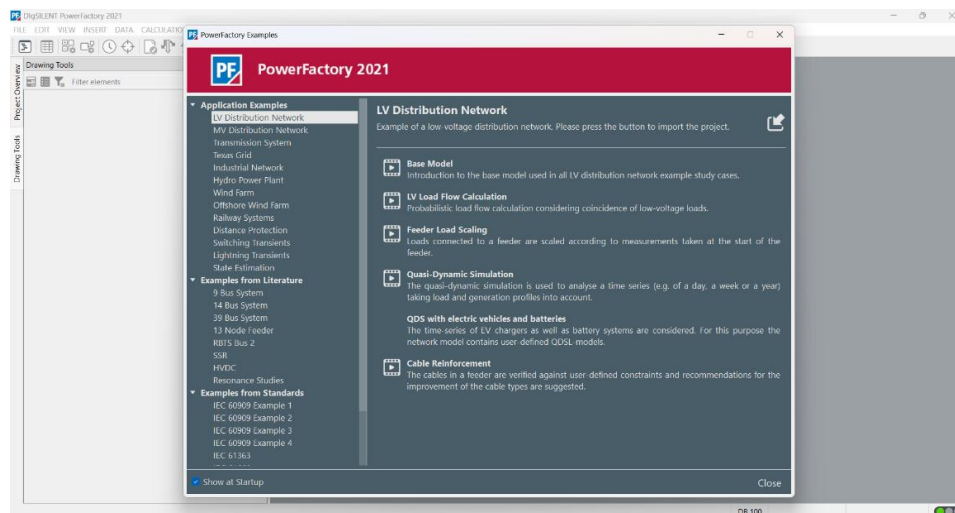
Dari data tersebut diatas untuk Penyulang Mawar dan Penyulang Line1 adalah penyulang sebagai sumber yang menyuply GH Prafi dimana terdapat penyulang Cartenz sebagai penyulang yang menerima supply dari kedua penyulang tersebut di GH Prafi.

Pada penelitian ini dilakukan pertimbangan menentukan titik penempatan trafo *AVR (Automatic Transformer Regulator)* untuk memperbaiki kualitas tegangan dan rugi-rugi daya pada penyulang Cartenz di GH Prafi.

Sebelumnya dilakukan pembuatan simulasi kondisi system Penyulang Mawar, Line1 dan Cartenz pada aplikasi digsilent dengan memasukkan semua parameter penyulang misal Panjang penyulang, jenis dan ukuran penghantar yang digunakan, serta pembebanan penyulang.

4.3 Penginputan Single Line Diagram Ke Aplikasi Digsilent

Pada penelitian ini simulasi manuver penyulang menggunakan aplikasi Digsilent Powerfactory 2021. Beberapa data yang akan diinputkan pada digsilent diantaranya adalah mesin pembangkit, kubikel 20 KV, Busbar, trafo tenaga, relay proteksi, kabel/penghantar, perangkat LBS/Recloser, trafo distribusi.

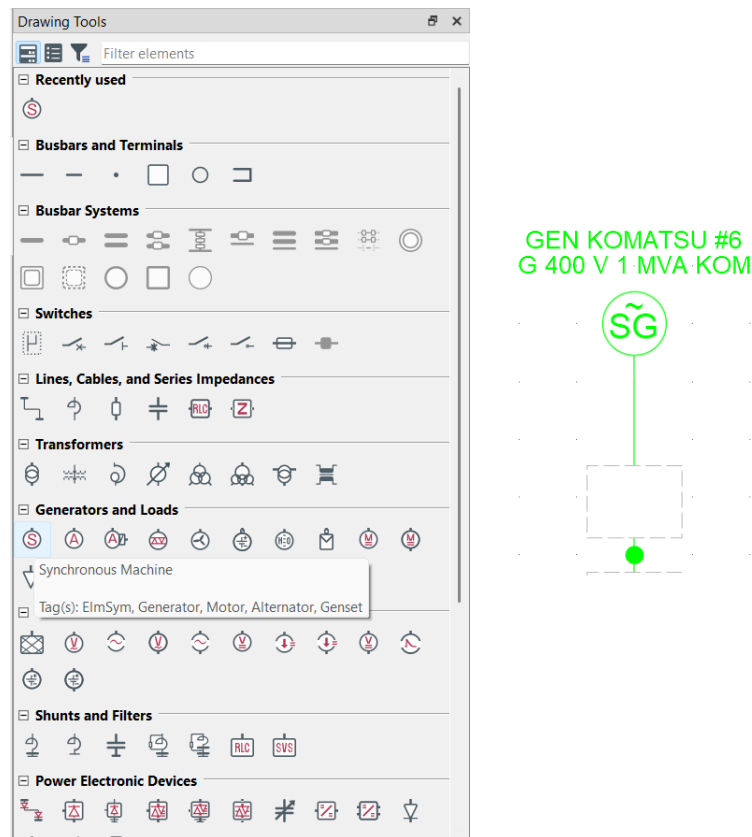


Gambar 4.2 Tampilan Menu Awal Digsilent Power Factory 2021

- **Penginputan Data Mesin**

Merupakan penginputan data mesin pembangkit pada SLD menggunakan symbol Synchronous machine seperti pada gambar 4.3.

Menggunakan symbol synchronous machine untuk menambahkan data mesin pembangkit pada system. Kemudian setelah symbol untuk mesin sinkron sudah diinput pada lembar kerja Digsilent maka dilakukan penginputan data seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Simbol Synchronous Machine Untuk Mesin Pembangkit

The image displays two screenshots of a software interface for machine data entry.

Top Screenshot: General Tab (Grounding/Neutral Conductor)

- Name:** GEN KOMATSU #6
- Type:** Equipment Type Library\G 400 V 1 MVA KOM
- Terminal:** MWK\SGNG\TR KOM#6\Cub_4 (TR KOM#6)
- Zone:** →
- Area:** →
- Out of Service:** ☐
- Technology:** 3PH-YN
- Number of parallel Machines:** 1
- Generator/Motor:** ☒ Generator, ☐ Motor
- Plant Category:** Others
- Subcategory:** →
- Plant Model:** MWK\SGNG\Plant_GEN KOMATSU #6

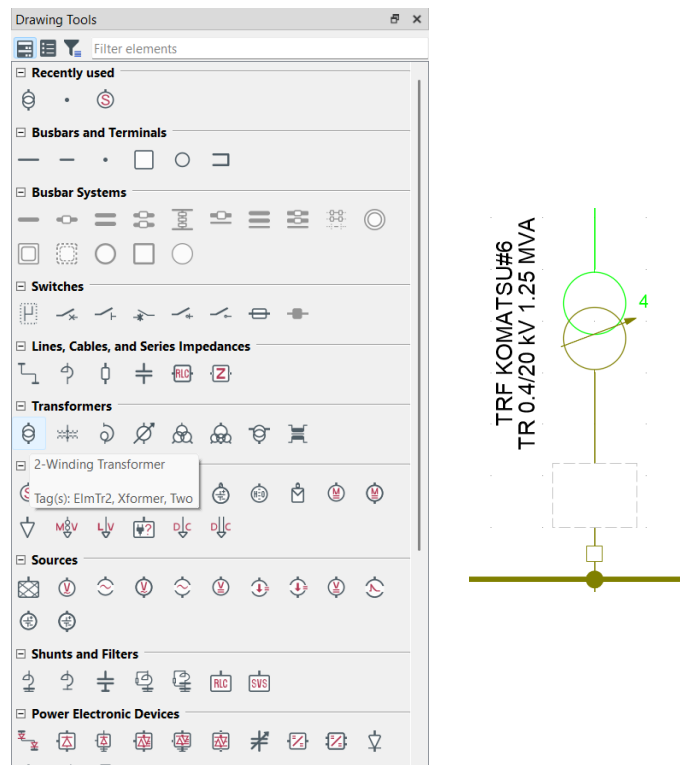
Bottom Screenshot: Basic Data Tab (G 400 V 1 MVA KOM)

- Name:** G 400 V 1 MVA KOM
- Rated Apparent Power:** 1, MVA
- Rated Voltage:** 0,4 kV
- Rated Power Factor:** 0,8
- No. of Phases:** 3
- Connection:** YN

Gambar 4.4 Tampilan Menu Penginputan Mesin Pembangkit

- **Penginputan Data Trafo**

Proses penginputan data Trafo tenaga disisi pembangkit atau trafo *step up* dari 0,4KV ke 20KV dan juga trafo distribusi 20 KV menggunakan symbol seperti gambar 4.5. Dan kemudian dilakukan penginputan data seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 Simbol 2 Winding Transformer Untuk Trafo Tenaga

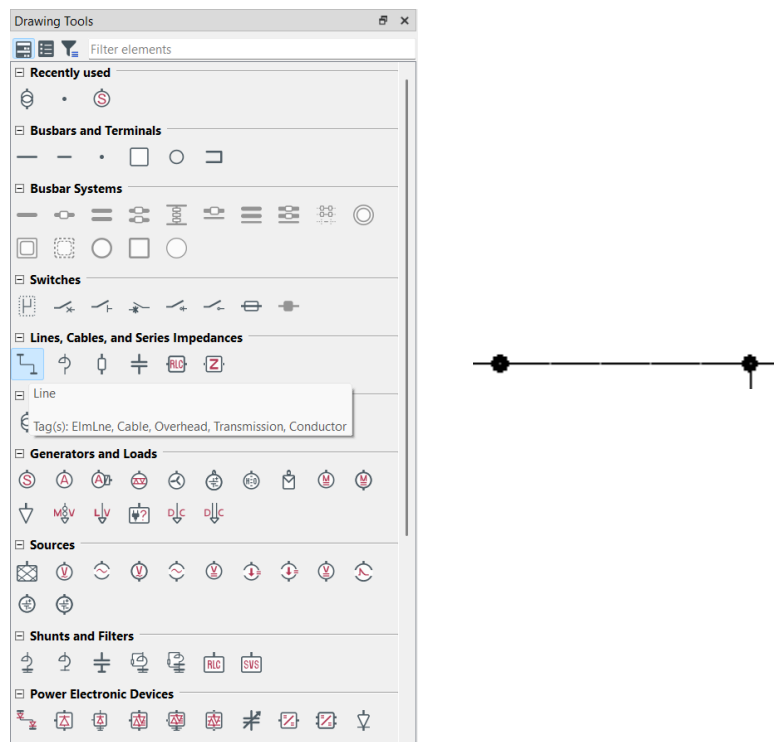
2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\TR 0.4/20 kV 1.25 MVA.TypeTr2

Basic Data	Name	TR 0.4/20 kV 1.25 MVA	OK	
Description	Technology	Three Phase Transformer	Cancel	
Version	Rated Power	1,25 MVA		
Load Flow	Nominal Frequency	50, Hz		
Short-Circuit VDE/IEC	Rated Voltage		Vector Group	
Short-Circuit Complete	HV-Side	20, kV	HV-Side	YN
Short-Circuit ANSI	LV-Side	0,4 kV	LV-Side	D
Short-Circuit IEC 61363			Phase Shift	5, *30deg
Short-Circuit DC	Positive Sequence Impedance		Name	YNd5
Simulation RMS	Short-Circuit Voltage uk	4, %		
Simulation EMT	Copper Losses	0, kW		
Protection	Zero Sequence Impedance			
Power Quality/Harmonics	Short-Circuit Voltage uk0	4, %		
Reliability	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0, %		
Hosting Capacity Analysis				
Optimal Power Flow				

Gambar 4.6 Tampilan Menu Penginputan Trafo Tenaga

- **Penginputan Penghantar / Kabel**

Proses penginputan asset kabel / penghantar pada jaringan distribusi 20KV menggunakan symbol line seperti pada gambar 4.7. Kemudian dilakukan penginputan data penghantar seperti pada gambar 4.8, diantaranya adalah penamaan identitas *sectionnya*, tegangan operasi, jenis kabel, impedansi urutan positif dan urutan nol kabel sesuai standart.



Gambar 4.7 Simbol Line Untuk Penghantar/Kabel

Gambar 4.8 Tampilan Menu Penginputan Kabel/Penghantar

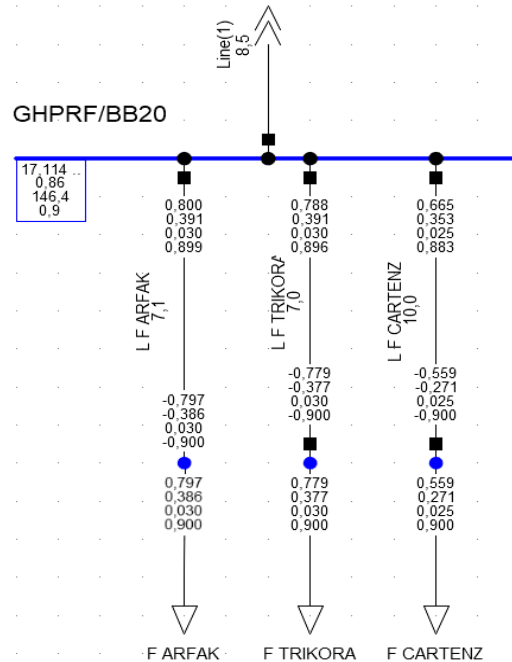
- **Referensi Impedansi Penghantar / Kabel AAAC Tegangan 20 KV**

Tabel 4.5 Data Impedansi Kabel AAAC (Sumber SPLN 64:1985)

Penampang nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urut	GMR (mm)	Impedansi urutan positif (Ω/km)	Impedansi urutan nol (Ω/km)
16	2,2563	7	1,638	2,0161+ j 0,4036	2,1641+ j 1,6911
25	2,8203	7	2,0475	1,2903+ j 0,3895	1,4384+ j 1,6770
35	3,3371	7	2,4227	0,9217+ j 0,3790	1,0697+ j 1,6665
50	3,9886	7	2,8957	0,6452+ j 0,3678	0,7932+ j 1,6553
70	4,7193	7	3,4262	0,4608+ j 0,3572	0,6088+ j 1,6447
95	5,4979	19	4,1674	0,3396+ j 0,3449	0,4876+ j 1,6324
120	6,1791	19	4,6837	0,2688+ j 0,3376	0,4168+ j 1,6251
150	6,9084	19	5,2365	0,2162+ j 0,3305	0,3631+ j 1,6180
185	7,6722	19	5,8155	0,1744+ j 0,3239	0,3224+ j 1,6114
240	8,7386	19	6,6238	0,1344+ j 0,3158	0,2824+ j 1,6033

4.4 Simulasi Load Flow Digsilent Penyulang Cartenz

Berikut merupakan simulasi load flow digsilent untuk penyulang Cartenz dan tampilan kondisi existing untuk jatuh tegangan dan rugi daya :



Gambar 4.9 Tampilan Load Flow Penyulang Cartenz

Pada gambar 4.9 menunjukkan load flow pada digsilent untuk penyulang Cartenz di GH Prafi. Tegangan yang terlihat pada hasil load flow adalah 17.114 Volt dan juga untuk nilai rugi daya pada penyulang cartenz adalah sebagai berikut :

		DigSILENT	Project:
		PowerFactory	
		2021 SP2	Date: 08/03/2026
Load Flow Calculation		Area Summary	
AC Load Flow, balanced, positive sequence	No	Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic tap adjustment of transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error	
Consider reactive power limits	Yes	Bus Equations(HV)	1,00 kVA
		Model Equations	0,10 %
Area: Cartenz		Study Case: Grid Manokwari	Annex: / 1
Generation	=	0,00 MW	0,00 Mvar
External Infeed	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Inter Area Flow	=	-0,19 MW	-0,21 Mvar
Load P(U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un-U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Motor Load	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Grid Losses	=	0,19 MW	
Line Charging	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Compensation ind.	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Compensation cap.	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Installed Capacity	=	0,00 MW	
Spinning Reserve	=	0,00 MW	
Total Power Factor:			
Generation	=	0,00 [-]	
Load/Motor	=	0,00 / 0,00 [-]	

Gambar 4.10 Tampilan Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz

Untuk nilai rugi daya pada penyulang Cartenz seperti gambar 4.10 yaitu sebesar 0,19 MW sesuai dari hasil load flow pada Digsilent. Kondisi jatuh tegangan seperti pada gambar 4.9 merupakan kondisi yang membutuhkan perhatian serius karena nilai tegangan tersebut posisi dipangkal penyulang Cartenz yang sudah sangat jatuh nilai tegangan yaitu 17.114 Volt dimana nilai tersebut tidak masuk standart yaitu untuk standart jatuh tegangan yang diperbolehkan adalah sesuai standart SPLN 56-2:1994 Pasal 4 yaitu Tegangan terendah yang diizinkan adalah - 5%, dan juga sesuai standart SPLN 72 Tahun 1987 Pasal 4 Ayat 19 yaitu turun tegangan TM yang diperbolehkan adalah 5%. Jika nominal tegangan kerja TM adalah 20.000 Volt maka nilai penurunan tegangan yang diizinkan sesuai standart 5% adalah turun sebesar 1000 volt sehingga tegangan kerja TM yang diperbolehkan penurunan menjadi sampai 19.000 Volt.

Pada penelitian ini akan dilakukan fokus perbaikan nilai tegangan pada pangkal penyulang Cartenz dan nilai rugi daya, terutama nilai tegangan yang merupakan tegangan pelayanan yang langsung dirasakan pelanggan untuk penggunaan peralatan elektronik yang selama ini sangat mengganggu dan menjadi keluhan masif pelanggan di wilayah prafi. Sehingga membutuhkan perbaikan serius dan penanganan cepat.

4.5 Perhitungan Detail Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz

Sesuai pada gambar 4.10 yaitu nilai rugi daya pada Penyulang Cartenz yang sudah di load flow pada Digsilent yaitu sebesar 0,19 MW, maka pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan detail terkait estimasi kerugian daya dalam bentuk Energi (KWH) dan juga dalam bentuk rupiah dalam kurun waktu tertentu.

Untuk rugi daya yang terjadi sesuai simulasi pada Digsilent yaitu sebesar 0,19MW, jika dihitung dalam bentuk energi yang hilang adalah sebagai berikut $0,19\text{MW} \times 1000 \times 1 \text{ jam} = 190 \text{ kWh}$, sehingga rugi daya yang terjadi pada kondisi penyulang Cartenz selama 1 jam adalah sebesar 190 kWh, jika dihitung selama 1 hari maka nilai rugi dayanya adalah $190 \text{ kWh} \times 24 \text{ jam} = 4.560 \text{ kWh}$, jika dihitung selama 1 Tahun maka nilai energi yang hilang adalah sebesar $4.560 \text{ kWh} \times 365 \text{ hari} = 1.664.400 \text{ kWh}$. Jika nilai rugi daya yang terjadi pada Penyulang Cartenz diubah

menjadi nilai rupiah (berdasarkan Tarif Dasar Listrik PLN Tahun 2026) maka nilainya adalah $1.664.400 \times \text{Rp } 1.444,7/\text{kWh}$ (menggunakan TDL untuk rata-rata penggunaan rumah tangga) = Rp 2.404.558.680

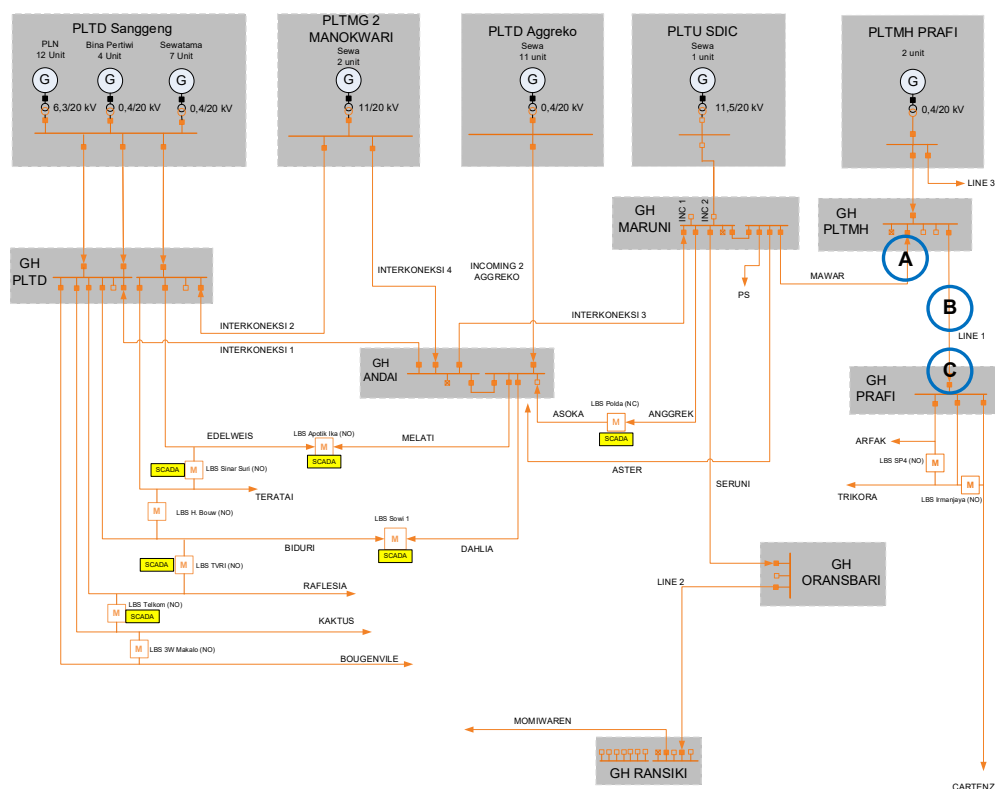
4.6 Solusi Mengatasi Jatuh Tegangan & Rugi Daya Pada Saluran SUTM

Terdapat beberapa solusi untuk mengatasi jatuh tegangan dan rugi daya pada suatu saluran SUTM diantaranya adalah :

1. Melakukan uprating penghantar/kabel dari kabel dengan berpenampang diameter kecil menjadi kabel dengan berpenampang diameter lebih besar, misal dari Kabel ukuran 70mm^2 menjadi 150mm^2 (tidak digunakan metode ini dikarenakan membutuhkan waktu yang cukup lama dan Panjang penyulang yang sangat panjang)
2. Merubah tapping Trafo Tenaga dan Trafo distribusi (tidak digunakan metode ini dikarenakan harus merubah banyak tapping trafo dilapangan dan membutuhkan pemadaman system yang cukup lama serta pekerjaan dilakukan butuh waktu lama serta jika terjadi naik turun tegangan rawan terjadi tidak stabil tegangan Kembali di sisi pelanggan dikarenakan tapping trafo yang sudah dirubah)
3. Pemindahan sebagian beban gardu penyulang ke penyulang lain yang masih relatif lebih kecil bebannya (tidak menggunakan metode ini dikarenakan jaringan hanya berbentuk radial sehingga tidak ada opsi untuk memindahkan beban penyulang ke penyulang lain)
4. Pemasangan Trafo AVR (Automatic Voltage Regulator) pada jaringan sekitar titik yang mengalami jatuh tegangan (Metode ini digunakan karena dapat mengatasi permasalahan jatuh tegangan secara permanen dan fleksibilitasnya yang dapat menyesuaikan naik turunnya tegangan pada jaringan untuk keluaran tegangan yang stabil di range 20.000 volt, selain itu sangat cocok digunakan pada system dengan karakteristik jaringan yang radial dengan asset yang relative sangat Panjang diatas 100 kms yang tidak dapat diperbaiki kualitas tegangan di ujung selain dipasang Trafo AVR untuk memperbaiki kualitas tegangan di ujung jaringan)

4.7 Penentuan Lokasi Pemasangan Trafo AVR

Pada penelitian ini untuk memperbaiki terjadinya jatuh tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz dilakukan perbaikan dengan cara pemasangan trafo *AVR* namun terdapat beberapa opsi penentuan titik lokasi pemasangan trafo *AVR* diantaranya adalah sebagai berikut :



Gambar 4.11 Titik Opsi Rencana Pemasangan Trafo AVR

Sesuai gambar 4.11 menunjukkan titik opsi lokasi pemasangan Trafo AVR yaitu :

- A. Titik Sebelum masuk GH PLTMH
- B. Titik tengah antara GH PLTMH dan GH Prafi
- C. Titik sebelum masuk GH Prafi

Dari ketiga titik rencana tersebut dilakukan simulasi menggunakan Digsilent Power Factory untuk melihat perbandingan titik mana yang paling baik untuk nilai tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz.

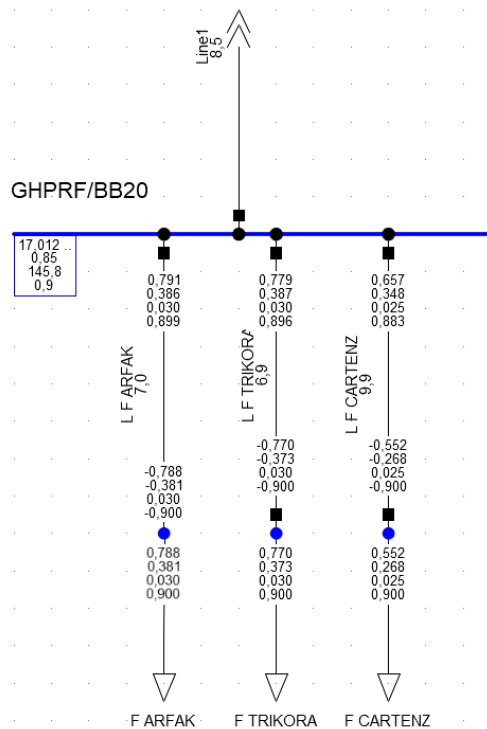
Berikut merupakan hasil simulasi nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz jika dilakukan pemasangan Trafo AVR pada ketiga titik opsi yang sudah direncanakan :

A. Titik Sebelum Masuk GH PLTMH

Dari simulasi disgilent berikut merupakan hasil dari nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz jika Trafo AVR dipasang di titik A sesuai pada Gambar 4.12 :

		Digsilent	Project:
		PowerFactory	
		2021 SP2	Date: 09/03/2026
Load Flow Calculation		Area Summary	
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic tap adjustment of transformers		Max. Acceptable Load Flow Error	1,00 kVA
Consider reactive power limits		Bus Equations (HV)	0,10 %
Model Equations			
Area: Cartenz		Study Case: Grid Manokwari	Annex: / 1
Generation	=	0,00 MW	0,00 Mvar
External Infeed	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Inter Area Flow	=	-0,10 MW	-0,08 Mvar
Load P(U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un-U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Motor Load	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Grid Losses	=	0,10 MW	0,08 Mvar
Line Charging	=		0,00 Mvar
Compensation ind.	=		0,00 Mvar
Compensation cap.	=		0,00 Mvar
Installed Capacity	=	0,00 MW	
Spinning Reserve	=	0,00 MW	
Total Power Factor:			
Generation	=	0,00 [-]	
Load/Motor	=	0,00 / 0,00 [-]	

Gambar 4.12 Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik A



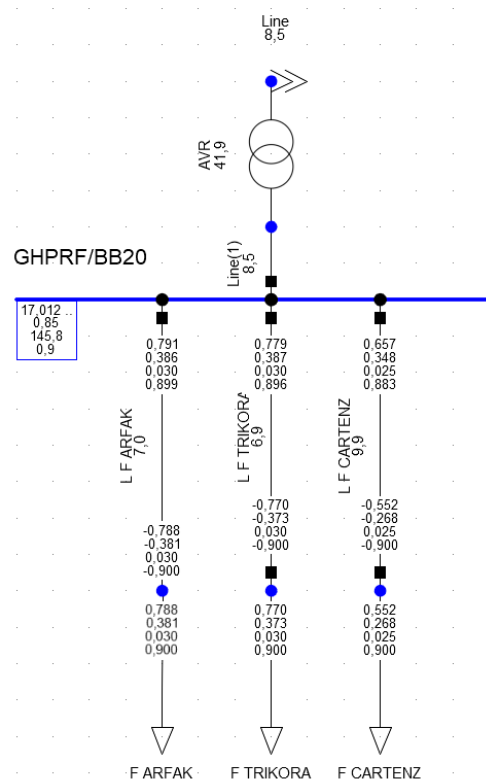
Gambar 4.13 Nilai Tegangan Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik A

B. Titik Antara GH PLTMH dan GH Prafi

Dari simulasi disgsilent berikut merupakan hasil dari nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz jika Trafo AVR dipasang di titik B sesuai pada Gambar 4.14 :

		DigSILENT Project:	
		PowerFactory Date: 09/03/2026	
Load Flow Calculation		Area Summary	
AC Load Flow, balanced, positive sequence	No	Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic tap adjustment of transformers	Yes	Max. Acceptable Load Flow Error	1,00 kVA
Consider reactive power limits		Bus Equations (HV)	0,10 %
		Model Equations	
Area: Cartenz		Study Case: Grid Manokwari	
		Annex: / 1	
Generation	=	0,00 MW	0,00 Mvar
External Infeed	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Inter Area Flow	=	-0,15 MW	-0,15 Mvar
Load P(U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Load P(Un-U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Motor Load	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Grid Losses	=	0,15 MW	0,00 MVA
Line Charging	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Compensation ind.	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Compensation cap.	=	0,00 MW	0,00 Mvar
Installed Capacity	=	0,00 MW	
Spinning Reserve	=	0,00 MW	
Total Power Factor:			
Generation	=	0,00 [-]	
Load/Motor	=	0,00 / 0,00 [-]	

Gambar 4.14 Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik B



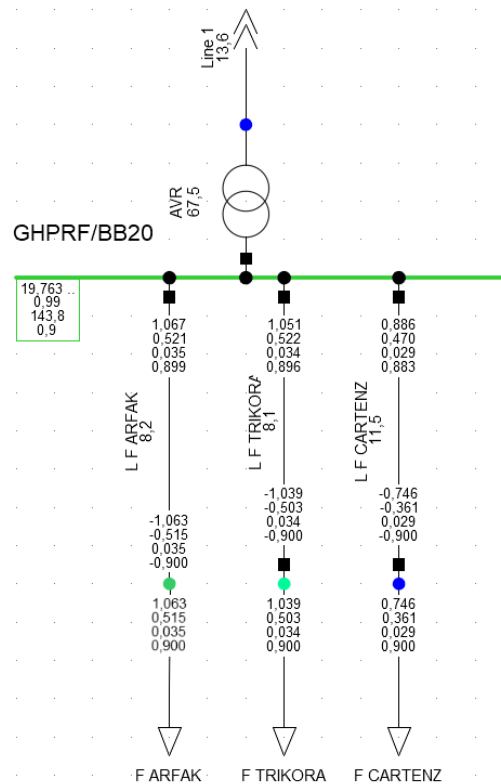
Gambar 4.15 Nilai Tegangan Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik B

C. Titik Sebelum Masuk GH Prafi

Dari simulasi disgilent berikut merupakan hasil dari nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada penyulang Cartenz jika Trafo AVR dipasang di titik C sesuai pada Gambar 4.16 :

		DigSILENT		Project:	
		PowerFactory			
		2021 SP2		Date: 09/03/2026	
Load Flow Calculation				Area Summary	
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence		No	
Automatic tap adjustment of transformers		No	Max. Acceptable Load Flow Error		
Consider reactive power limits		Yes	Bus Equations (HV)		1,00 kVA
			Model Equations		0,10 %
Area: Cartenz		Study Case: Grid Manokwari		Annex: / 1	
Generation	=	0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA	
External Infeed	=	0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA	
Inter Area Flow	=	-0,14 MW	-0,11 Mvar		
Load P (U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA	
Load P (Un)	=	0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA	
Load P (Un-U)	=	0,00 MW	0,00 Mvar		
Motor Load	=	0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA	
Grid Losses	=	0,14 MW	0,11 Mvar		
Line Charging	=		0,00 Mvar		
Compensation ind.	=		0,00 Mvar		
Compensation cap.	=		0,00 Mvar		
Installed Capacity	=	0,00 MW			
Spinning Reserve	=	0,00 MW			
Total Power Factor:					
Generation	=	0,00			[-]
Load/Motor	=	0,00 / 0,00			[-]

Gambar 4.16 Nilai Rugi Daya Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik C



Gambar 4.17 Nilai Tegangan Penyulang Cartenz Untuk Rencana Trafo AVR di Titik C

Dari ketiga titik opsi pemasangan Trafo *AVR* berikut rekap hasilnya :

Tabel 4.6 Data Rugi Daya & Nilai Tegangan Hasil Simulasi Digsilent

NO	TITIK RENCANA	LOKASI	NILAI RUGI DAYA (MW)	NILAI TEGANGAN (KV)
1	A	Sebelum Masuk GH PLTMH	0,10	17,012
2	B	Antara GH PLTMH dan GH Prafi	0,15	17,012
3	C	Sebelum Masuk GH Prafi	0,14	19,763

Berdasarkan tabel 4.6 hasil simulasi Digsilent pemasangan Trafo *AVR* pada 3 titik rencana lokasi, untuk titik A dan titik B nilai rugi daya lebih baik dibandingkan sebelum dipasang Trafo *AVR* yaitu 0,19MW namun untuk nilai tegangan pada penyulang Cartenz tidak mengalami perbaikan dari nilai tegangan sebelumnya yaitu 17,114KV. Jika dilihat pada titik C untuk rugi daya mengalami perbaikan setelah dipasang trafo *AVR* yaitu dari 0,19MW menjadi 0,14MW dan untuk nilai tegangan juga mengalami perbaikan yaitu dari 17,114KV menjadi 19,763KV, sehingga pada penelitian ini fokus pembahasan sesuai hasil simulasi dengan nilai perbaikan terbaik yaitu pada titik rencana C di lokasi sebelum masuk GH Prafi akan dilakukan pemasangan Trafo *AVR*.

Tabel 4.7 Nilai Rugi Daya & Jatuh Tegangan Sebelum & Sesudah Pemasangan Trafo *AVR*

NO	TITIK RENCANA	LOKASI	NILAI RUGI DAYA (MW)	NILAI TEGANGAN (KV)
SEBELUM PEMASANGAN TRAF0 AVR			0,19	17,114
SETELAH PEMASANGAN TRAF0 AVR				
1	A	Sebelum Masuk GH PLTMH	0,10	17,012
2	B	Antara GH PLTMH dan GH Prafi	0,15	17,012
3	C	Sebelum Masuk GH Prafi	0,14	19,763

4.8 Perhitungan Nilai Saving Energi Penyulang Cartenz Pasca Pemasangan Trafo AVR

Pada pembahasan di Sub Bab 4.7 tentang penentuan lokasi untuk pemasangan trafo AVR dengan lokasi terbaik adalah di titik C yaitu pemasangan sebelum masuk di GH Prafi, dengan hasil nilai sebelum dan sesudah seperti pada tabel 4.8 :

Tabel 4.8 Nilai Rugi Daya dan Nilai Tegangan Penyulang Cartenz Sebelum & Sesudah Pemasangan Trafo AVR

KETERANGAN	NILAI RUGI DAYA (MW)	NILAI TEGANGAN (KV)
SEBELUM PEMASANGAN TRAFO AVR	0,19	17,114
SETELAH PEMASANGAN TRAFO AVR	0,14	19,763

Terlihat pada tabel 4.8 bahwa setelah dilakukan pemasangan Trafo AVR Penyulang Cartenz mengalami perbaikan nilai Rugi daya dari 0,19 MW menjadi 0,14MW dan juga mengalami perbaikan nilai tegangan yaitu dari 17,114KV menjadi 19,763KV.

Untuk kondisi energi yang hilang sebelum pemasangan Trafo AVR adalah sebagai berikut :

$$\text{Plosses (sebelum)} = 0,19 \text{ MW}$$

$$\text{Plosses (sebelum)} = 0,19 \text{ MW} \times 1000 = 190 \text{ kW}$$

$$\text{Wlosses (sebelum)} 1 \text{ jam} = 190 \text{ kW} \times 1 \text{ jam} = 190 \text{ kWh}$$

$$\text{Wlosses (sebelum)} 1 \text{ hari} = 190 \text{ kWh} \times 24 \text{ jam} = 4.560 \text{ kWh}$$

$$\text{Wlosses (sebelum)} 1 \text{ tahun} = 4.560 \text{ kWh} \times 365 \text{ hari} = 1.664.400 \text{ kWh}$$

Jika dirupiahkan menggunakan asumsi Tarif dasar Listrik pemakaian rata-rata konsumen rumah tangga biasa dikarenakan jenis pelanggan terbanyak di Penyulang Cartenz adalah rumah tangga biasa tidak

ada Bisnis ataupun Industri yaitu menggunakan tarif Rp1.444,7/kwh, sehingga nilainya adalah sebagai berikut :

Rupiah Penjualan Energi yang hilang setahun (sebelum) = 1.664.400 kWh
x Rp1.444,7 = Rp 2.404.558.680

Untuk kondisi energi yang hilang setelah pemasangan Trafo AVR adalah sebagai berikut :

Plosses (sesudah) = 0,14 MW

Plosses (sesudah) = 0,14 MW x 1000 = 140 kW

Wlosses (sesudah) 1 jam = 140 kW x 1 jam = 140 kWh

Wlosses (sesudah) 1 hari = 140 kWh x 24 jam = 3.360 kWh

Wlosses (sesudah) 1 tahun = 3.360 kWh x 365 hari = 1.226.400 kWh

Jika dirupiahkan menggunakan asumsi Tarif dasar Listrik pemakaian rata-rata konsumen rumah tangga biasa dikarenakan jenis pelanggan terbanyak di Penyulang Cartenz adalah rumah tangga biasa tidak ada Bisnis ataupun Industri yaitu menggunakan tarif Rp1.444,7/kwh, sehingga nilainya adalah sebagai berikut :

Rupiah Penjualan Energi yang hilang setahun (sesudah) = 1.226.400 kWh x
Rp1.444,7 = Rp 1.771.780.080

Dari perhitungan tersebut untuk nilai saving energi yang dapat diselamatkan selama 1 Tahun ketika sudah dilakukan pemasangan trafo AVR adalah sebesar 4.560 kWh – 3.360 kWh = 1.200 kWh atau jika dirupiahkan yaitu saving penjualan energi yang dapat diselamatkan selama 1 Tahun adalah sebesar Rp 2.404.558.680 - Rp 1.771.780.080 = Rp 632.778.600

4.9 Usia Trafo, Kebutuhan Biaya Investasi & Biaya Pemeliharaan

Menurut standar IEC 60076-7 Tahun 2005 bahwa usia sebuah transformator adalah 20,55 Tahun. Sehingga pada penelitian ini untuk perhitungan kemampuan trafo *AVR* akan digunakan nilai usia trafo 20 Tahun, terutama untuk perhitungan nilai investasi terhadap nilai *saving*.

Dalam pengoperasian Trafo *AVR* dibutuhkan periode inspeksi dan pemeliharaan preventif tahunan untuk memastikan bahwa trafo tidak ada anomali secara fisik maupun anomali saat beroperasi. Untuk estimasi kebutuhan biaya pemeliharaan preventif yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

Tabel 4.9 Rencana Biaya Pemeliharaan *Preventif* Trafo *AVR*



PENAWARAN HARGA
PROJECT : PLN UIW PAPUA

No	Description	Quantity	Satuan	Unit Price (Rp)	Total Price (Rp)
1.	Maintenance OLTC Transformers				
	Scope Pekerjaan :				
	- Insulation Resistance Test				
	- Turn Test Ratio				
	- Torque Check				
	- Winding Resistance				
	- Protection Check				
	- BDV Test				
	- Cleaning Bushing & Top Cover				
	a. Trafo Merk Trafindo 1 x 7000 kVA	1	Unit	15.000.000	15.000.000
2.	Oil Analysis	1	Unit	15.500.000	15.500.000
	Scope Pekerjaan :				
	- Dissolved Gas Analysis (DGA)				
	- Furan Analysis				
	- Dielectric Dissipation Factor & Resistivity @90°C				
	- Colour & appearance				
	- Water content				
	- Neutralization / Total Acidity				
	- Interfacial Tension				
	- Breakdown Voltage				
	- Sediment & sludge				
	- Flashpoint PMCC				
	- OQIN (Oil quality index number)				
	- Corrosive sulphur				
	- Inhibitor Content				
	- PCB Content				
3.	Transportasi dan Akomodasi				
	- Transportasi dan akomodasi teknisi	1	Lot	40.000.000	40.000.000
	Total				70.500.000

Sumber : Pabrik PT.Trafindo

Dari tabel 4.9 merupakan penawaran dari pihak pabrian Trafo *AVR* untuk kegiatan pemeliharaan *preventif* trafo 7MW yaitu sebesar Rp 70.500.000 yang butuh dilaksanakan selama 1 kali dalam 1 Tahun.

Kemudian untuk biaya investasi yang dibutuhkan dalam melaksanakan pemasangan Trafo AVR mulai dari pembeliannya hingga pembangunan konstruksinya adalah sebagai berikut :

Tabel 4.10 Rencana Biaya Pembelian & Pemasangan Trafo AVR

RENCANA ANGGARAN BIAYA (RAB) NEGOSIASI HARGA PENAWARAN PEKERJAAN PENGADAAN SISTEM STABILISASI TEGANGAN DISTRIBUSI LOKASI : PLN UP3 MANOKWARI								
No Urut	Uraian Jenis Pekerjaan & Material	Sat	Vol	Material (Rp.)	Jasa (Rp.)	Jumlah Material (Rp.)	Jumlah Jasa (Rp.)	Jumlah Total (Rp.)
I MATERIAL UTAMA								
1	AVR 7000 KVA	Unit	1	2.760.000.000	65.000.000	2.760.000.000	65.000.000	2.825.000.000
2	Kubikel Coupling 20 kV	cell	1	PLN	2.500.000	0	2.500.000	2.500.000
3	Kabel TM 240 mm2 three core 20 kV	Mtr	150	PLN	10.000	0	1.500.000	1.500.000
4	Disconnecting Switch 24 KV 630 Amp	set	1	75.000.000	3.000.000	75.000.000	3.000.000	78.000.000
Jumlah I						2.835.000.000	72.000.000	2.907.000.000
II MATERIAL PELENGKAP								
1	Terminating 20 KV 240 mm2 In door	set	2	7.000.000	1.500.000	14.000.000	3.000.000	17.000.000
2	Terminating 20 KV 240 mm2 Out door	set	2	7.000.000	1.500.000	14.000.000	3.000.000	17.000.000
3	Dyna bolt 17mm2 u/penqunci dudukan kubikel	bh	4	25.000	1.000	100.000	4.000	104.000
4	Kabel schoen 240mm2	bh	18	300.000	1.000	5.400.000	18.000	5.418.000
5	Duck Kabel	mtr	40	900.000	15.000	36.000.000	600.000	36.600.000
6	Kabel Tray (30cmx10cmx240cm) Lengkap	mtr	40	1.750.000	15.000	70.000.000	600.000	70.600.000
7	Kawat BC 50 mm2 (Pentanahan)	mtr	60	225.000	5.000	13.500.000	300.000	13.800.000
8	Elektroda Arde / Gorund Material	bh	6	1.500.000	100.000	9.000.000	600.000	9.600.000
9	Unimak Klem CU 70/120mm2	bh	9	100.000	5.000	900.000	45.000	945.000
10	Battery Charger 110 VDC	unit	1	83.000.000	2.500.000	83.000.000	2.500.000	85.500.000
11	CCO-Compression Connector	bh	6	55.000	5.000	330.000	30.000	360.000
Jumlah II						246.230.000	10.697.000	256.927.000
III KONSTRUKSI PENDUKUNG								
1	Pondasi Trafo 2.100 cm x 1.500 cm	m2	4	0	8.500.000	0	34.000.000	34.000.000
2	Pembuatan Lantai Kerja	m2	25	0	5.000.000	0	125.000.000	125.000.000
3	Pembuatan Rabat Lantai	m2	10	0	1.500.000	0	15.000.000	15.000.000
4	Pembuatan dan Pemasangan Pagar BRC 3 mtr	Mtr	32	2.500.000	500.000	80.000.000	16.000.000	96.000.000
5	Pembuatan Saluran Kabel 50x50x50 cm	Mtr	15	0	1.000.000	0	15.000.000	15.000.000
6	Pengadaan Dudukan kabel vertikal trafo	Set	2	2.000.000	250.000	4.000.000	500.000	4.500.000
7	Pengadaan Isolasi Scoth untuk TM 20 KV	bh	5	75.000	5.000	375.000	25.000	400.000
8	Pengadaan dan Pemasangan Papan Tanda Bahaya	bh	4	75.000	5.000	300.000	20.000	320.000
9	Pengadaan Apar Portable Ukuran 5 kg	Mtr	4	1.750.000	0	7.000.000	0	7.000.000
10	Penerangan Gardu	titik	4	2.500.000	300.000	10.000.000	1.200.000	11.200.000
11	Landscape Lahan Sekitar Gardu	lot	2	12.000.000	2.500.000	24.000.000	5.000.000	29.000.000
12	Travers dudukan kabel pada tianq	bh	3	1.000.000	15.000	3.000.000	45.000	3.045.000
13	Pipa Galvanis 6 mtr 4 Inc	blq	2	1.500.000	15.000	3.000.000	30.000	3.030.000
14	Klem Kabel 4 Inc	bh	8	750.000	1.000	6.000.000	8.000	6.008.000
15	Pondasi Tianq	titik	2	500.000	25.000	1.000.000	50.000	1.050.000
16	Bak Kontrol Arde / Pentanahan	bh	3	1.000.000	0	3.000.000	0	3.000.000
Jumlah III						141.675.000	211.878.000	353.553.000
IV TRANSPORTASI								
1	Pengiriman Material dari Jakarta ke Manowari dan Mobilisasi	Ls	1	0	300.000.000	0	300.000.000	300.000.000
Jumlah IV						0	300.000.000	300.000.000
V TEST COMMISSIONING								
1	Commissioning	Ls	1	0	20.000.000	0	20.000.000	20.000.000
Jumlah V						0	20.000.000	20.000.000
Terbilang :								3.837.480.000
Empat miliar dua ratus lima puluh sembilan juta enam ratus dua ribu delapan ratus rupiah								422.122.800
								4.259.602.800

Untuk nilai biaya investasi awal pembelian dan pembangunan konstruksi Trafo AVR berdasarkan dari kontrak pekerjaan pemasangan dan pembelian trafo AVR antara PLN UIW Papua & Papua Barat dengan PT.Trafindo adalah sebesar Rp 4.259.602.800.

4.10 Perhitungan Nilai Tekno Ekonomi

4.10.1 Analisis Metode *Benefit Cost Ratio (BCR)*

Setelah dilakukan simulasi menggunakan digsilent terkait kondisi Sistem Penyulang Cartenz baik itu sebelum dan juga sesudah dilakukan pemasangan trafo

AVR, kemudian dilakukan perhitungan nilai rugi daya dan juga dalam bentuk kerugian Rupiah, dan juga dilakukan perhitungan keuntungan nilai *saving* rupiah yang didapatkan jika dilakukan pemasangan trafo *AVR* untuk mendapatkan perbaikan nilai rugi daya dan jatuh tegangan, maka selanjutnya adalah dilakukan perhitungan aspek tekno ekonomi atas kondisi rugi daya pada sistem penyulang Cartenz dan pasca dilakukannya *project* perbaikan dengan pemasangan trafo *AVR*. Pada penelitian ini analisis aspek tekno ekonomi dilakukan menggunakan metode *benefit cost ratio* (BCR).

Metode *benefit cost ratio* (BCR) biasanya digunakan pada tahap evaluasi awal perencanaan investasi. Metode *benefit cost ratio* (BCR) adalah analisis ekonomi untuk mengevaluasi kelayakan proyek dengan membandingkan total nilai manfaat (benefit) terhadap total biaya (cost).

Rumus Umum :

$$BCR = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}}$$

Kriteria keputusan :

Pengambilan keputusan layak atau tidaknya suatu investasi dengan metode ini dapat disesuaikan melalui kriteria berikut :

Jika :

$BCR \geq 1$ maka investasi layak

$BCR \leq 1$ maka investasi tidak layak

Parameter Benefit dan Cost pada penelitian ini terdiri dari beberapa yaitu :

- Benefit :
 - Nilai Rugi Daya saat sebelum dipasang Trafo AVR
 - Nilai Rugi Daya saat sesudah dipasang Trafo AVR
 - Saving selisih rugi daya dikonversi menjadi kwh dan nilai Rupiah
 - Target nilai keuntungan saving rugi daya selama kurun waktu trafo *AVR* bisa beroperasi

- Selisih penjualan kwh sebelum dan sesudah pemasangan Trafo AVR
- Cost :
 - Biaya operasional untuk preventive maintenance
 - Biaya investasi pengadaan dan pemasangan Trafo AVR

Untuk nilai benefit yang didapat dari *project* pemasangan trafo AVR ini adalah nilai rupiah kerugian jika sistem tidak dipasang trafo AVR selama 1 tahun (sesuai perhitungan pada sub bab 4.8) dikurangi dengan nilai rupiah kerugian saat sistem sudah dipasang dengan Trafo AVR selama 1 tahun, kemudian dikalikan dengan durasi usia trafo sesuai standart IEC 60076-7 Tahun 2005 bahwa usia sebuah transformator adalah 20,55 Tahun, diambil nilai pembulatan yaitu 20 Tahun, sehingga perhitungan nilai benefitnya adalah sebagai berikut :

- Nilai Benefit 1 Tahun $\text{Rp } 2.404.558.680 - \text{Rp } 1.771.780.080 = \text{Rp } 632.778.600$
- Nilai Benefit 20 Tahun $= \text{Rp } 632.778.600 \times 20 \text{ Tahun} = \text{Rp } 12.655.572.000$

Sehingga jika penyulang Cartenz dilakukan pemasangan trafo AVR maka dengan kemampuan trafo dengan usia operasional 20 Tahun, maka nilai *saving* keuntungan yang bisa diselamatkan masuk sebagai pendapatan perusahaan adalah sebesar Rp 12.655.572.000.

Kemudian untuk nilai cost yang diperlukan agar *project* pemasangan trafo AVR bisa berjalan dibutuhkan nilai investasi pengadaan dan pembangunan awal serta biaya operasional yaitu untuk dilakukan pemeliharaan *preventive* agar performa trafo dapat selalu terjaga dengan baik, nilainya yaitu :

- Nilai investasi awal yaitu Rp 4.259.602.800 (sesuai RAB rencana awal pembangunan pada Sub bab 4.9)
- Nilai biaya operasional untuk pemeliharaan *preventif* yaitu sebesar Rp 70.500.000 selama 1 Tahun sekali, jika usia trafo dapat beroperasi hingga 20 Tahun maka total biaya operasional untuk pemeliharaan *preventif* yaitu sebesar $\text{Rp } 70.500.000 \times 20 \text{ Tahun} = \text{Rp } 1.410.000.000$

Dari nilai tersebut dapat diakumulasikan bahwa nilai cost untuk *project* pemasangan trafo AVR ini adalah sebesar Rp 4.259.602.800 + Rp 1.410.000.000 = Rp 5.669.602.800.

Sehingga berdasarkan metode *benefit cost ratio* (BCR) dapat disimpulkan kelayakan aspek tekno ekonominya untuk pemasangan trafo AVR pada penyulang Cartenz ini, yaitu sebagai berikut :

$$BCR = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}} \quad BCR = \frac{12.655.572.000}{5.669.602.800} = 2,23$$

Berdasarkan kriteria keputusan dari metode BCR untuk menentukan kelayakan proyek ini adalah jika nilai BCR ≥ 1 maka proyek dinyatakan layak, namun jika nilai BCR ≤ 1 maka proyek dinyatakan tidak layak. Untuk perhitungan pada proyek pemasangan trafo AVR ini dengan hasil nilai BCR adalah 2,23, dimana nilai tersebut masuk dalam kriteria ≥ 1 maka proyek pemasangan trafo AVR untuk memperbaiki kondisi penyulang Cartenz ini dinyatakan layak karena nilai biaya-biaya yang dibutuhkan dibanding dengan benefit yang didapat ternyata lebih besar nilai benefit yang didapatkan. Sehingga dengan dilaksanakannya proyek ini, kondisi penyulang Cartenz dapat diperbaiki dan kerugian dalam bentuk rugi daya, energi serta kerugian penjualan energi listrik di PLN ULP Prafi dapat lebih ditekan. Selain dari sisi PLN tidak mengalami kerugian yang terlalu besar, selain itu dari sisi pelanggan juga tidak akan mengalami kerugian untuk pelayanan tegangan yang baik.

4.10.2 Analisis Metode *Net Present Value (NPV)* dan *Internal Rate of Return (IRR)*

Setelah dilakukan analisa tekno ekonomi menggunakan metode *Benefit Cost Ratio (BCR)* untuk memperkuat analisa tekno ekonomi pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode lainnya yaitu menggunakan metode *Net Present Value (NPV)* dan juga metode *Internal Rate of Return (IRR)*.

Net Present Value (NPV) adalah selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar selama periode tertentu. Untuk menentukan hasil dari perhitungan NPV ini terdapat kriteria keputusannya, diantaranya adalah :

- NPV Positif ($NPV > 0$) : Proyek atau investasi diperkirakan menguntungkan dan layak dijalankan karena menghasilkan nilai lebih besar dari modal yang diinvestasikan
- NPV Negatif ($NPV < 0$) : Investasi akan menimbulkan kerugian dan sebaiknya ditolak
- NPV Nol ($NPV = 0$) : Investasi hanya akan balik modal dan tidak menambah atau mengurangi nilai perusahaan

Metode ini digunakan dalam penganggaran modal suatu proyek dan perencanaan investasi untuk menghitung profitabilitas suatu proyek, dengan memperhitungkan nilai waktu uang (*time value of money*) dan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Dimana:

- I_0 = Investasi awal = Rp 4.259.602.800
- CF_t = Arus kas bersih per tahun = Rp 562.278.600
- i = Suku bunga diskonto
- n = Umur proyek = 20 tahun

Di mana i adalah tingkat suku bunga diskonto (*discount rate*). Kita akan menggunakan dua skenario tingkat suku bunga diskonto standar investasi yaitu **8%** dan **10%**.

Karena arus kas bersih bernilai konstan setiap tahunnya, kita dapat menggunakan faktor deret seragam (*Present Worth Factor untuk Annuity / PVIFA*) :

$$PVIFA = \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i}$$

Di mana:

- i = Tingkat suku bunga (*interest rate*) per periode
- n = Jumlah periode pembayaran (*number of periods*)

Skenario A: Tingkat Diskonto (i) = 8%

- Faktor Anuitas ($PVIFA_{8\%,20}$) = $\frac{1-(1+0,08)^{-20}}{0,08} \approx 9,8181$

Skenario B: Tingkat Diskonto (i) = 10%

- Faktor Anuitas ($PVIFA_{10\%,20}$) = $\frac{1-(1+0,10)^{-20}}{0,10} \approx 8,5136$

Sehingga rumus akhir untuk menghitung NPV untuk Skenario Tingkat dikonto 8% adalah :

$$NPV = -I_0 + CF_t \times \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right]$$

$$NPV = -4.259.602.800 + 562.278.600 \times \left[\frac{1 - (1 + 0,08)^{-20}}{0,08} \right] = 9,8181$$

$$NPV = -4.259.602.800 + (562.278.600 \times 9,8181)$$

$$NPV = -4.259.602.800 + 5.520.508.423$$

$$NPV = +Rp \mathbf{1.260.905.623}$$

Dan rumus akhir untuk menghitung NPV untuk Skenario Tingkat dikonto 10% adalah :

$$NPV = -I_0 + CF_t \times \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right]$$

$$NPV = -4.259.602.800 + 562.278.600 \times \left[\frac{1 - (1 + 0,10)^{-20}}{0,10} \right] = 8,5136$$

$$NPV = -4.259.602.800 + (562.278.600 \times 8,5136)$$

$$NPV = -4.259.602.800 + 4.787.014.128$$

$$NPV = +Rp \textbf{527.411.328}$$

Pada tingkat suku bunga diskonto 8% maupun 10%, nilai **NPV bernilai Positif (NPV > 0)** yang artinya nilai proyek ini akan tetap mendapatkan keuntungan dalam periode 20 Tahun pada kenaikan suku bunga 8% maupun 10%. Hal ini menunjukkan bahwa proyek pemasangan Trafo AVR di Penyulang Cartenz **Sangat Layak secara finansial** untuk dijalankan karena menghasilkan keuntungan bersih di atas biaya modal investasi.

Selanjutnya dilakukan juga analisa tekno ekonomi menggunakan metode *Internal Rate of Return (IRR)* untuk memperkuat analisa apakah proyek pemasangan Trafo AVR ini layak dilaksanakan.

IRR atau **Internal Rate of Return** adalah persentase tingkat pengembalian tahunan dari sebuah investasi atau proyek bisnis. Metrik ini menghitung suku bunga yang membuat nilai sekarang bersih atau NPV (Net Present Value) dari seluruh arus kas di masa depan sama dengan nol. Suatu proyek biasanya dianggap layak jika nilai IRR lebih tinggi daripada tingkat biaya modal atau target pengembalian yang disyaratkan perusahaan atau yang diharapkan Manajemen (biasanya disebut *discount rate* atau suku bunga acuan) atau biasa juga disebut *MARR (Minimum Attractive Rate of Return)*. Metode IRR dapat dihitung dengan rumusan sebagai berikut :

$$IRR = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} = 0$$

Keterangan :

B_t = Benefit pada tiap tahun

C_t = cost pada tiap tahun

t = 1,2,3.....

n = jumlah tahun

i = tingkat suku bunga (IRR)

Kriteria Keputusan :

- $IRR > \text{Tingkat Diskonto (MARR)}$: Proyek Layak. Tingkat keuntungan proyek lebih besar dari biaya modal/suku bunga bank.
- $IRR < \text{Tingkat Diskonto (MARR)}$: Proyek Tidak Layak.

Pada analisis proyek penelitian ini ditentukan untuk nilai MARR yaitu 8% sehingga diharapkan nilai IRR lebih besar dibandingkan dengan nilai MARR yang sudah ditetapkan agar proyek dinyatakan layak, berikut perhitungannya :

Berikut nilai parameter finansial yang digunakan untuk perhitungan penentuan IRR adalah sebagai berikut:

- Biaya Investasi Awal (C_0) = Rp 4.259.602.800
- Manfaat/Penghematan Energi per Tahun (B_t) = Rp 632.778.600
- Biaya Pemeliharaan Preventif per Tahun (C_t) = Rp 70.500.000
- Arus kas bersih tahunan ($B_t - C_t$) = Rp 632.778.600 – Rp 70.500.000 = Rp 562.278.600
- Umur Ekonomis Trafo (n) = 20 Tahun

Karena arus kas investasi keluar terjadi pada Tahun ke-0 (C_0) dan arus kas bersih tahunan ($B_t - C_t$) bernilai konstan dari Tahun 1 hingga 20, persamaan dapat dijabarkan menjadi :

$$0 = -C_0 + \sum_{t=1}^{20} \frac{\text{Rp } 562.278.600}{(1+i)^t}$$

$$C_0 = \sum_{t=1}^{20} \frac{\text{Rp } 562.278.600}{(1+i)^t}$$

$$\text{Rp } 4.259.602.800 = \sum_{t=1}^{20} \frac{\text{Rp } 562.278.600}{(1+i)^t}$$

$$\text{Rp } 4.259.602.800 = \text{Rp } 562.278.600 \times \sum_{t=1}^{20} \frac{1}{(1+i)^t}$$

$$\text{Rp } 4.259.602.800 = \text{Rp } 562.278.600 \times \left[\frac{1 - (1+i)^{-20}}{i} \right]$$

$$\frac{\text{Rp } 4.259.602.800}{\text{Rp } 562.278.600} = \frac{1 - (1+i)^{-20}}{i}$$

$$7,5756 = \frac{1 - (1+i)^{-20}}{i}$$

Nilai 7,5756 adalah sebuah angka rasio perbandingan yang memberi tahu kita seberapa cepat modal investasi awal akan tertutupi oleh pendapatan bersih tahunan. Artinya, jika uang penghematan sebesar Rp 562 Juta per tahun itu nilainya dianggap stabil dan tidak tergerus inflasi, maka modal Rp 4,2 Miliar yang PLN keluarkan akan lunas atau kembali modal dalam waktu sekitar 7,57 tahun (sekitar 7 tahun 6 bulan).

Di sinilah perhitungan ekonomi teknik masuk. Uang Rp 562 Juta yang diterima di Tahun ke-1 tentu nilainya lebih berharga dibandingkan uang Rp 562 Juta yang baru diterima di Tahun ke-20 karena adanya faktor inflasi dan suku bunga bank. Oleh karena itu, di dalam rumus keuangan terdapat rumus baku untuk menghitung total nilai uang masa depan yang ditarik ke masa sekarang (*Present Value Annuity Factor*):

$$\text{Faktor} = \frac{1 - (1+r)^{-20}}{i}$$

Selanjutnya kita mencari nilai IRR adalah mencari berapa nilai suku bunga (i) yang jika dimasukkan ke rumus di atas, hasilnya pas membentuk angka 7,5756. Dilakukan dengan cara interpolasi linier menggunakan rumus sebagai berikut :

$$i = DF_1 + \left(\frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \times (DF_2 - DF_1)$$

Keterangan :

DF_1 = Discount factor yang menghasilkan NPV positif

DF_2 = Discount factor yang menghasilkan NPV negatif

NPV_1 = net present value pada DF_1

NPV_2 = net present value pada DF_2

Untuk melakukan interpolasi linier, kita harus menentukan dua tingkat suku bunga acuan (*Discount Factor* / DF) yang menghasilkan nilai NPV positif (NPV_1) dan NPV negatif (NPV_2).

A. Uji Coba Tingkat Suku Bunga 11% ($DF_1 = 0,11$)

- Faktor Anuitas 11% = $\frac{1-(1+0,11)^{-20}}{0,11} = 7,9633$
- Perhitungan NPV_1 :

$$NPV_1 = (Rp\ 562.278.600 \times 7,9633) - Rp\ 4.259.602.800$$

$$NPV_1 = Rp\ 4.477.593.185 - Rp\ 4.259.602.800$$

$$NPV_1 = +Rp\ 217.990.385 \text{ (NPV Positif)}$$

B. Uji Coba Tingkat Suku Bunga 12% ($DF_2 = 0,12$)

- Faktor Anuitas 12% = $\frac{1-(1+0,12)^{-20}}{0,12} = 7,4694$
- Perhitungan NPV_2 :

$$NPV_2 = (Rp\ 562.278.600 \times 7,4694) - Rp\ 4.259.602.800$$

$$NPV_2 = Rp\ 4.200.583.791 - Rp\ 4.259.602.800$$

$$NPV_2 = -Rp\ 59.019.009 \text{ (NPV Negatif)}$$

Pada suku bunga 11% dan 12% sudah didapatkan hasil NPV positif dan negatif sehingga nilai IRR / suku bunga (*i*) berada diantara nilai tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus interpolasi linier dengan nilai suku bunga yang sudah ditentukan 11% dan 12% serta nilai NPV yang sudah didapatkan :

$$i = DF_1 + \left(\frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \times (DF_2 - DF_1)$$

$$i = 11\% + \frac{Rp\ 217.990.385}{Rp\ 217.990.385 - (-Rp\ 59.019.009)} \times (12\% - 11\%)$$

$$i = 11\% + \frac{217.990.385}{277.009.394} \times 1\%$$

$$i = 11\% + (0,7869 \times 1\%)$$

$$\mathbf{i = 11,79\% \text{ (Nilai IRR)}}$$

Untuk nilai IRR yang didapatkan adalah sebesar 11,79%, nilai ini lebih besar dibandingkan dari MARR yang ditentukan yaitu 8%, bahkan jika dibandingkan nilai batas umum MARR 10% pun nilai IRR yang didapatkan masih lebih tinggi, artinya proyek ini menguntungkan dan dinyatakan Layak proyek ini untuk dijalankan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan studi yang dilakukan mengenai penurunan tegangan dan kerugian daya pada Penyulang Cartenz di Gardu Hubung PLN Prafi, dapat disimpulkan beberapa poin penting, antara lain :

1. Metode perbaikan kondisi jatuh tegangan dan rugi daya pada Penyulang Cartenz adalah dengan melakukan studi perbandingan pemasangan Trafo AVR di 3 titik opsi Lokasi yaitu titik A sebelum masuk GH PLTMH, titik B ditengah antara GH PLTMH dan GH Prafi, dan titik yang terbaik untuk perbaikan Penyulang Cartenz adalah pada titik C tepatnya sebelum masuk ke GH Prafi, dinyatakan titik terbaik karena titik C yang paling ideal kondisi perbaikannya yaitu nilai rugi daya yang lebih baik dari sebelumnya dan nilai level tegangan yang lebih dari sebelumnya serta nilainya sesuai standard level tegangan yang direkomendasikan
2. Tegangan Pangkal Penyulang Cartenz sebelum pemasangan trafo AVR adalah sebesar 17,114 KV dan setelah dilakukan pemasangan Trafo AVR mengalami perbaikan menjadi sebesar 19,763 KV
3. Rugi daya Penyulang Cartenz sebelum pemasangan trafo AVR Adalah sebesar 0,19 MW dan setelah dilakukan pemasangan Trafo AVR mengalami perbaikan menjadi sebesar 0,14 MW
4. Berdasarkan analisis tekno ekonomi untuk proyek pada penelitian ini, yaitu menggunakan metode *Benefit Cost Ratio (BCR)* dengan hasil nilai 2,23 lebih besar dari 1, metode *Net Present Value (NPV)* dengan hasil nilai lebih besar dari nol, metode *Internal Rate of Return (IRR)* dengan hasil nilai lebih besar dari nilai *MARR* yang sudah ditentukan sebelumnya, dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa proyek pemasangan *Trafo AVR* pada penelitian ini dinyatakan Layak untuk dilaksanakan

5.2 Saran

Pada penelitian ini masih terdapat beberapa potensi untuk dilakukan pengembangan yang lebih luas dan mendetail demi penyempurnaan penelitian seperti ini atau sejenisnya agar lebih dapat bermanfaat memberikan kajian dengan hasil yang lebih disempurnakan, diantaranya adalah :

1. Penelitian untuk perbaikan tegangan bisa diberikan opsi untuk melakukan studi dengan solusi lebih dari 1 atau ditambahkan solusi perbaikan selain pemasangan Trafo AVR sebagai perbandingan keuntungan dari sisi nilai investasi dan hasil nilai teknis
2. Analisis tekno ekonomi bisa ditambahkan metode lainnya agar dapat lebih luas pertimbangan dampak tekno ekonominya terhadap project yang dilaksanakan contohnya ditambahkan juga analisis metode payback period atau lainnya

DAFTAR PUSTAKA

- Sandi Daniel Binsar., Hakim Lukmanul., & Gusmedi Herri (2016). Studi Pemasangan Step Voltage Regulator dengan Model Injeksi Daya pada Jaringan Menengah 20 KV Penyulang Katu Gardu Induk Menggala
- Subhan., Fauzi., Asyadi Murisal.T., Muliadi., Syukri., & Masrurha Febriza (2023). Analisa Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Distribusi 20 kV Di GH Tangse ULP Beureunuen
- Maheka Sika.M. (2023). Analisa Perbaikan Jatuh Tegangan Dengan Pemasangan *Automatic Voltage Regulator* Pada Penyulang Durian 4 Pt Pln Rayon Rasau Jaya
- Muslimin., Suyono Hadi., & Hasanah Nur R. (2013). Perbaikan Profil Tegangan pada *Feeder* Harapan Baru Lima (H5) Area Samarinda untuk Pengurangan Susut Energi
- Darmana Ija. (2020). Perbaikan Jatuh Tegangan Dengan Pemasangan Automatic Voltage Regulator
- Saadah Ayati., Arsyad Iqbal., & Junaidi (2019). Studi Perencanaan Pembangunan Penyulang Baru Untuk Pembagian Beban Penyulang Sahang 1 Dan Raya 17 Pt Pln (Persero) Ulp Siantan
- Reza Kurniawan (2019). Analisis Studi Kelayakan Keuangan Sentra Peningkatan Performa Olahraga Indonesia (SP2OI) di Menara Mandiri
- Ardilla Dwi Budiarta, dkk (2021). Analisis Ekonomi Teknik Perencenanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem *Hybrid* Pada Atap Kandang Ayam *Closed House* Di Tualang Kabupaten Serdang Bedagai

Lancar Siahaan, dkk (2021). Studi Penempatan Automatic Voltage Regulator
Pada Jaringan Distribusi

Dr. Zainuri, S.T., M.T. (2021) Buku Ekonomi Teknik Hal 90-96

Deny Fatkhur Rohman, dkk (2024). Improvement Of Power Losses And
Voltage Drops 20kv Distribution Network At Intako Feeder
Porong Sidoarjo

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Aris Firmansyah lahir di Surabaya, Jawa Timur, pada tahun 1994. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Institut Teknologi PLN Jakarta pada Program Studi Teknik Elektro, dan lulus pada tahun 2023. Selama masa studi sarjana, penulis menunjukkan minat yang besar terhadap bidang elektro, yang menjadi dasar untuk pengembangan karier akademiknya.

Setelah menyelesaikan studi sarjana, penulis melanjutkan pendidikan Magister (S2) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Jurusan Teknik Elektro, Rekayasa Elektrik Berkelanjutan. Penulis berhasil menyelesaikan studi magisternya pada tahun 2026. Untuk berkomunikasi lebih lanjut, penulis dapat dihubungi melalui email: arisfirmansyah1994@gmail.com



**PERNYATAAN KODE ETIK
PENGUNAAN GENERATIVE AI**

**Code of Conduct Statement
Generative AI or AI-Assisted Usage**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

I, the undersigned :

Nama Lengkap / *Full name* : ARIS FIRMANSYAH
NRP / *Student ID* : 6022241017
Program Studi / *Study Program* : REKAYASA ELEKTRIK BERKELANJUTAN
Judul / *Title* : *ANALYSIS OF LOCATION DETERMINATION
AND ADDITION OF 20KV AVR TRANSFORMER
TO IMPROVE VOLTAGE QUALITY, POWER
LOSSES AND TECHNO ECONOMICS AT THE
CARTENZ FEEDER AT PLN ULP PRAFI*
Pembimbing / *Supervisors* : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
Prof. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Menyatakan dalam pengerjaan Tugas Akhir/Tesis/Disertasi* dengan judul tersebut di atas:

State that during the finalization of my final project/thesis/dissertation with the title above :*

No.	Pernyataan / <i>Statement</i>	Checklist (☒)
1	Hanya menggunakan Generative AI sebagai alat bantu untuk memperbaiki tata bahasa pada Tugas Akhir / Thesis / Disertasi saya. Ini tidak digunakan untuk membuat keseluruhan isi pekerjaan saya. <i>Generative AI is used only as a tool to improve the readability or language of the text in my Final Project / Thesis / Dissertation*. It is not used to generate a complete text of my work.</i>	☒
2	Telah memeriksa dan/atau memperbaiki seluruh bagian dari pekerjaan saya yang dibantu oleh Generative AI agar sesuai dengan baku mutu penulisan karya ilmiah <i>I have checked and/or refined all parts of my work that is assisted by Generative AI in such a way that it complies with the standard of academic writing</i>	☒
3	Tidak menggunakan Generative AI untuk pembuatan data primer, grafik dan/atau tabel pada pekerjaan saya. <i>Generative AI was not used to generate primary data, figure and/or table in my works.</i>	☒

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Nama Dokumen	:	FORM PERNYATAAN PENGUNAAN AI
No. Dokumen	:	001/ST_AI/DTE/V/2025
Halaman	:	2 dari 2

No.	Pernyataan / <i>Statement</i>	Checklist (☒)
4	Penulis telah memberikan atribusi/pengakuan terhadap alat AI yang digunakan, secara rinci pada suatu bagian pada lampiran. <i>The author has acknowledged the use of Generative AI in any part of the work in the specific appendix page.</i>	☒
5	Buku tugas akhir / Tesis / Disertasi * telah mematuhi Baku Mutu Akademik ITS terkait keaslian karya dan etika penulisan. <i>The final project/thesis/dissertation* has complied with the Academic Standard of ITS related to the originality of scientific work and scientific writing code of conduct</i>	☒
6	Penulis memastikan tidak ada plagiarisme, termasuk yang berasal dari penggunaan AI. <i>The authors have ensured that there is no plagiarism issue in the work, including any parts generated by AI.</i>	☒

Catatan/note: * Pilih salah satu yang sesuai / choose the appropriate term

Tempat/ <i>Place</i>	: SURABAYA
Tanggal/ <i>Date</i>	: 16 JUNI 2026
Nama Lengkap/ Full Name	: ARIS FIRMANSYAH
Tanda tangan/ Signature	: 