

SKRIPSI

**STUDI EFEK PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA
SISTEM KELISTRIKAN TERISOLASI
(STUDI KASUS PULAU SELAYAR)**

Disusun dan diajukan oleh:

ASMAH NUR ARIFIN

D041 18 1306



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

SKRIPSI

**STUDI EFEK PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA
SISTEM KELISTRIKAN TERISOLASI
(STUDI KASUS PULAU SELAYAR)**

Disusun dan diajukan oleh:

ASMAH NUR ARIFIN

D041 18 1306



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**STUDI EFEK PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA SISTEM KELISTRIKAN
TERISOLASI
(STUDI KASUS: PULAU SELAYAR)**

Disusun dan diajukan oleh:

ASMAH NUR ARIFIN

D041 18 1306

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 25 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

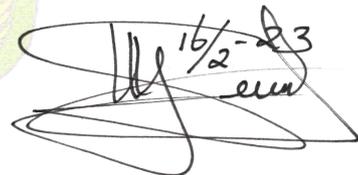
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

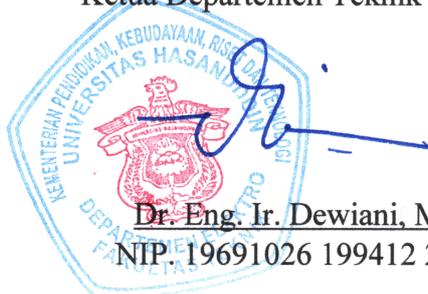


Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP. 19760914 200801 1 006



Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T.
NIP. 19590708 198802 1 001

Ketua Departemen Teknik Elektro,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Asmah Nur Arifin

NIM : D041181306

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

STUDI EFEK PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA SISTEM
KELISTRIKAN TERISOLASI (STUDI KASUS: PULAU SELAYAR)

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

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

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

Gowa, 25 Januari 2023

Yang Menyatakan



Asmah Nur Arifin

ABSTRAK

ASMAH NUR ARIFIN, Studi Efek Pemasangan Kapasitor Bank pada Sistem Kelistrikan Terisolasi (Studi Kasus: Pulau Selayar) (dibimbing oleh Ikhlas Kitta dan Yustinus Upa Sombolayuk)

Penurunan nilai profil tegangan dan peningkatan rugi daya dalam proses penyaluran daya listrik merupakan masalah yang sering terjadi pada suatu sistem distribusi utamanya pada jaringan tegangan menengah yang diakibatkan jauhnya jarak antara pusat pembangkit dengan pusat beban. Pemasangan kapasitor bank yang optimal pada sistem distribusi merupakan salah satu cara untuk mengatasi gangguan tersebut sehingga dapat memaksimalkan kualitas tegangan saat proses penyaluran daya listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor bank yang optimal untuk memperbaiki nilai profil tegangan dan meminimalkan rugi daya. Studi kasus yang digunakan adalah Sistem Kelistrikan 20 kV Pulau Selayar dengan menerapkan *Optimal Capacitor Placement* (OCP) yang merupakan salah satu *tool* dalam *software* ETAP dengan menerapkan metode Algoritma Genetika (GA). Optimasi dilakukan sebanyak dua kali dengan memilih kandidat bus yang berbeda dengan total tiga skenario. Hasil simulasi OCP menunjukkan skenario 1 memerlukan kapasitor bank berkapasitas 362,8 kVAR yang dipasang pada bus 347, skenario 2 memerlukan kapasitor bank berkapasitas 362,4 kVAR yang dipasang pada bus 353, dan skenario 3 merupakan gabungan skenario 1 dan 2. Berdasarkan hasil simulasi aliran daya dan analisa secara ekonomi didapatkan skenario 2 merupakan skenario yang paling optimal yang dapat menaikkan nilai profil tegangan sebesar 1,3% pada bus yang mengalami penurunan nilai profil tegangan yaitu pada bus 341, bus 342, dan bus 347 menjadi 0,9620 p.u dan bus 348, bus 349, bus 353, bus 354, dan bus 355 menjadi 0,9625 p.u. Dengan kapasitor ini juga dapat mereduksi nilai rugi daya sebesar 5,35% di mana sebelumnya total rugi daya yaitu 145,8 kW menjadi 138 kW. Biaya yang diperlukan untuk pemasangan kapasitor bank ini adalah Rp513.333.000,- dan keuntungan setiap tahunnya adalah Rp173.513.041,-.

Kata kunci: Kapasitor Bank, Profil Tegangan, Rugi Daya, Efek Pemasangan Kapasitor, *Optimal Capacitor Placement*, ETAP

ABSTRACT

ASMAH NUR ARIFIN, *Study of the Effects of Installing Bank Capacitors at Isolated Electrical System (Case Study: Selayar Island)* (supervised by Ikhlas Kitta and Yustinus Upa Sombolayuk)

A decrease in the value of the voltage profile and an increase in power loss in the process of distributing electric power is a problem that often occurs in a distribution system, especially in medium voltage networks, due to the long distance between the generating center and the load center. Installing optimal capacitor banks in the distribution system is one way to overcome these disturbances to maximize the voltage quality while distributing electric power. This study aims to determine the optimal location and capacity of the capacitor bank to improve the voltage profile value and minimize power loss. The case study used is the Selayar Island 20 kV Electrical System by implementing Optimal Capacitor Placement (OCP), which is one of the tools in the ETAP software by applying the Genetic Algorithm (GA) method. Optimization was carried out twice by selecting different bus candidates with a total of three scenarios. The OCP simulation results show that scenario 1 requires a capacitor bank with a capacity of 362.8 kVAR installed on bus 347, scenario 2 requires a capacitor bank with a capacity of 362.4 kVAR installed on bus 353, and scenario 3 is a combination of scenarios 1 and 2. Based on the flow simulation results, scenario 2 is the most optimal in power and economic analysis. Scenario 2 can increase the value of the voltage profile by 1.3% on buses that have a decrease in the value of the voltage profile at bus 341, bus 342, and bus 347 to 0.9620 each unit, and bus 348, bus 349, bus 353, bus 354, and bus 355 to 0.9625 each unit. This capacitor can also reduce the value of the power loss by 5.35%, where previously, the total power loss was 145.8 kW to 138 kW. The cost required for installing this capacitor bank is IDR 513,333,000, and the annual profit is IDR 173,513,041.

Keywords— Capacitor Bank, Voltage Profile, Power Loss, Capacitor Installation Effect, Optimal Capacitor Placement, ETAP

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “STUDI EFEK PEMASANGAN KAPASITOR PADA SISTEM KELISTRIKAN TERISOLASI STUDI KASUS PULAU SELAYAR” dapat terselesaikan. Penyelesaian skripsi ini merupakan salah satu upaya penulis untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari tanpa adanya kemauan dan usaha serta bantuan dari berbagai pihak, maka skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh sebab itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- 1) Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T. selaku Dosen Penguji I dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. selaku Dosen Penguji II.
- 3) Seluruh dosen dan staf pegawai Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu dan memberi kemudahan selama menempuh proses perkuliahan.
- 4) Seluruh staf pegawai PT. PLN (Persero) ULPLTD Selayar dan PT. PLN (Persero) ULP Selayar yang senantiasa membantu dalam proses pengumpulan data yang akan digunakan dalam penelitian ini.
- 5) Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 6) Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku dekan Fakultas Teknik dan Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
- 7) Kedua orang tua yang sangat saya cintai yang telah memberikan doa dan dukungan baik dari segi moril dan materi.
- 8) Kakak dan adik saya, Ima dan Aizah, yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.

- 9) Kepada seluruh anggota *Together to Heaven* yang telah menjadi teman yang selalu memberikan dukungan dan semangat di setiap langkah saya.
- 10) Kepada Ainun dan Qoni yang telah menemani dan membantu serta berdiskusi dari awal hingga akhir pengerjaan skripsi ini.
- 11) Kepada member EXO yang selalu menjadi penyemangat di setiap harinya terutama Oh Sehun.
- 12) Kepada teman-teman Lab Riset Grup Infrastruktur Ketenagalistrikan dan T3 yang selalu menemani di lab saat proses penyusunan skripsi ini.
- 13) Semua teman-teman seperjuangan CAL18RATOR. Kuatkan diri kalian dan jangan pernah ragu. Karena tidak ada satu pun orang yang hentikan langkah kalian untuk MERAH MIMPI.
- 14) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu demi satu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan pada skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik dari semua pihak dapat menjadi masukan untuk menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat diterima sebagai sumbangan hasil pemikiran penulis. Sehingga dapat mendatangkan manfaat bagi penulis maupun pembacanya.

Gowa, 25 Januari 2023

Asmah Nur Arifin

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Rumusan Masalah	2
I.4. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	3
I.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Sistem Distribusi	5
2.1.1 Struktur Sistem Distribusi	6
2.1.2. Sistem Distribusi Radial.....	9
2.2. Beban.....	9
2.3. Jatuh Tegangan.....	11
2.4. Kualitas Daya Listrik	12
2.5. Faktor Daya	12
2.6. Perbaikan Faktor Daya	14
2.7. Metode Aliran Daya	15
2.8. Kapasitor Bank.....	16
2.9. Rugi-Rugi pada Sistem Distribusi.....	19
2.10. Analisa Penempatan Kapasitor Bank	19
2.11. <i>Electric Transient and Analysis Program (ETAP)</i>	20
2.12. <i>Optimal Capacitor Placement (OCP)</i>	20

2.13. Metode <i>Net Present Value</i> (NPV).....	21
2.14. Penelitian Terkait Sebelumnya.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1. Jenis Data dan Lokasi Penelitian.....	23
3.2. Alat dan Langkah-Langkah Penelitian.....	23
3.3. Metode Penelitian.....	23
3.3.1 Metode Pengumpulan Data.....	23
3.3.2. Metode Analisa.....	24
3.4. Diagram Alur Penelitian.....	26
BAB IV HASIL DAN DISKUSI.....	27
4.1. Sistem Kelistrikan Pulau Selayar.....	27
4.2. Data Pembangkit Sistem Kelistrikan Pulau Selayar.....	27
4.3. Penyaluran Distribusi Sistem Kelistrikan Pulau Selayar.....	28
4.5. Simulasi Aliran Daya pada <i>Software ETAP Power Station 19.0.1</i>	39
4.6. Penempatan Optimal Kapasitor.....	47
4.6.1. Penentuan Kandidat Bus.....	48
4.6.2. Penentuan Kapasitas dan Lokasi Kapasitor Bank.....	48
4.6.3. Pemasangan Kapasitor Bank.....	49
4.6.3.1. Skenario 1.....	50
4.6.3.2. Skenario 2.....	50
4.6.3.3. Skenario 3.....	51
4.7. Analisa Hasil Simulasi Skenario 1, 2, dan 3.....	52
4.8. Analisa Ekonomi.....	62
BAB V SIMPULAN DAN SARAN.....	67
V.1. Simpulan.....	67
V.2. Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA.....	69
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Diagram satu garis tipikal jaringan distribusi tenaga listrik.....	5
Gambar 2 Skema jaringan distribusi	6
Gambar 3 Gardu induk.....	7
Gambar 4 Jaringan distribusi primer 20 kV	7
Gambar 5 Gardu distribusi jenis tiang	8
Gambar 6 Jaringan distribusi sekunder 220 V	8
Gambar 7 Sistem distribusi radial.....	9
Gambar 8 Segitiga daya	13
Gambar 9 Prinsip perbaikan faktor daya.....	14
Gambar 10 Rangkaian ekivalen saluran dengan kapasitor shunt.....	17
Gambar 11 Diagram Phasor (a). Saluran Tanpa Kapasitor Shunt	17
(b). Saluran Dengan Kapasitor Shunt.....	17
Gambar 12 Diagram alur penelitian.....	26
Gambar 13 Diagram satu garis sistem kelistrikan Pulau Selayar	27
Gambar 14 Pemodelan sistem kelistrikan Pulau Selayar.....	39
Gambar 15 Simulasi aliran daya sistem kelistrikan Pulau Selayar	39
Gambar 16 Grafik profil tegangan sebelum pemasangan kapistor bank	46
Gambar 17 Tool OCP ETAP 19.0.1.....	48
Gambar 18 Study Case OCP ETAP 19.0.1	48
Gambar 19 Toolbox OCP ETAP 19.0.1.....	49
Gambar 20 Running OCP ETAP 19.0.1	49
Gambar 21 Hasil optimal capacitor placement skenario 1.....	50
Gambar 22 Lokasi penempatan kapasitor bank skenario 1.....	50
Gambar 23 Hasil optimal capacitor placement skenario 2.....	51
Gambar 24 Lokasi penempatan kapasitor bank skenario 2.....	51
Gambar 25 Lokasi penempatan kapasitor bank skenario 3.....	52
Gambar 26 Grafik perbandingan nilai tegangan	60
Gambar 27 Grafik perbandingan nilai rugi-rugi daya.....	61
Gambar 28 Grafik NPV skenario 1	64
Gambar 29 Grafik NPV skenario 2.....	65

Gambar 30 Grafik NPV skenario 3.....66

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Data spesifikasi PLTD	27
Tabel 2. Data spesifikasi PLTS	28
Tabel 3. Data penyulang sistem kelistrikan Pulau Selayar	28
Tabel 4. Data kabel sistem kelistrikan Pulau Selayar	29
Tabel 5. Data beban sistem kelistrikan Pulau Selayar	30
Tabel 6. Nilai tegangan hasil aliran daya kondisi awal.....	40
Tabel 7. Data total rugi daya hasil aliran daya kondisi awal	47
Tabel 8. Perbandingan nilai tegangan pada kondisi awal, skenario 1, 2, dan 3....	53
Tabel 9. Perbandingan nilai rugi daya pada kondisi awal, skenario 1, 2, dan 3 ...	61
Tabel 10. Daftar harga dan spesifikasi kapasitor bank	62
Tabel 11. Perhitungan biaya pemasangan kapasitor bank	62
Tabel 12. Asumsi harga bahan bakar berdasarkan RUPTL PLN 2021-2030	63
Tabel 13. Net present value skenario 1	63
Tabel 14. Net present value skenario 2	65
Tabel 15. Net present value skenario 3	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Layout</i> sistem kelistrikan Kabupaten Kepulauan Selayar	71
Lampiran 2 <i>Layout</i> penyebaran trafo pada sistem kelistrikan Pulau Selayar	72
Lampiran 3 Diagram satu garis pembangkitan ULPLTD Selayar	73
Lampiran 4 Diagram satu garis PLTS Hibrid Selayar	74
Lampiran 5 Data satuan pembangkit diesel PLTD Selayar	75
Lampiran 6 <i>Summary</i> kondisi awal.....	76
Lampiran 7 <i>Summary</i> skenario 1.....	77
Lampiran 8 <i>Summary</i> skenario 2.....	78
Lampiran 9 <i>Summary</i> skenario 3.....	78
Lampiran 10 Aliran daya optimal	80

BAB I PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

PT. PLN (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak pada bidang penyediaan energi listrik untuk mengelola dan menyalurkan daya listrik ke konsumen secara kontinu dengan kualitas baik. Kegiatan penyelenggaraan ketenagalistrikan di Indonesia, dilaksanakan sesuai dengan Undang-Undang No.15 Tahun 1985 tentang Ketenagalistrikan dan peraturan pelaksanaannya.

Energi memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia. Jumlah penggunaan energi di Indonesia meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia, dan peningkatan taraf hidup serta kemajuan IPTEK terus meningkat. Berdasarkan sensus penduduk di Pulau Selayar dalam 10 tahun terakhir mengalami peningkatan jumlah penduduk yang cukup signifikan sekitar ± 1000 jiwa setiap tahunnya. Dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk di Indonesia maka kebutuhan energi listrik juga ikut meningkat. Pulau Selayar memiliki daerah yang terpisah dari daratan Sulawesi Selatan yang menyebabkan sistem kelistrikan pada daerah tersebut terisolasi dan hanya memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Proses penyaluran daya listrik dari pusat pembangkit menuju pusat beban membutuhkan penyaluran daya listrik yang memiliki kualitas tegangan dan faktor kerja tetap berada pada level yang diizinkan. Keandalan dari suatu sistem tenaga listrik terutama pada sistem distribusi yang merupakan bagian sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Keandalan dapat ditingkatkan dengan melakukan penjagaan terhadap kualitas daya agar stabilitas sistem tenaga listrik tetap terjaga. Masalah kualitas tegangan dan kompensasi daya reaktif perlu mendapatkan prioritas sehingga rugi energi dan jatuh tegangan pada sistem distribusi memiliki nilai yang relatif kecil. Oleh karena itu, PT. PLN (Persero) diharapkan dapat menjaga kontinuitas penyaluran daya listrik agar tetap pada level tegangan dan faktor kerja berdasarkan standar yang ditetapkan.

Salah satu kendala diakibatkan oleh aspek rugi-rugi daya akibat jarak antar pusat pembangkit dengan pusat beban yang jauh. Pengaruh dari rugi-rugi energi ini menimbulkan hilangnya energi yang besar. Jaringan distribusi yang tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka semua kebutuhan beban reaktif akan ditanggung oleh pembangkit. Sehingga akan mengakibatkan mengalirnya arus reaktif pada jaringan yang berdampak terjadi penurunan faktor daya, jatuh tegangan dan peningkatan rugi energi pada jaringan. Hal ini akan menimbulkan kerugian pada PT. PLN (Persero) sebagai penyedia tenaga listrik dan juga pada sisi konsumen. Salah satu cara untuk mengurangi dampak dari jauhnya jarak dari pusat pembangkit ke pusat beban pada jaringan tenaga listrik yaitu dengan menjaga agar nilai tegangan kerja tetap berada pada batas yang diizinkan. Alternatif yang dapat dilakukan yaitu dengan memasang kapasitor bank yang berfungsi untuk memperbaiki faktor daya. Dengan pemasangan kapasitor pada sistem distribusi diharapkan dapat menurunkan rugi energi dan jatuh tegangan pada sistem distribusi.

Dalam penelitian ini penulis akan menguraikan untuk menganalisa efek dari pemasangan kapasitor bank pada sistem distribusi yang mana penulis membuat dalam penelitian dengan judul “**Studi Efek Pemasangan Kapasitor pada Sistem Kelistrikan Terisolasi Studi Kasus Pulau Selayar**” Di mana pada proses menggunakan metode algoritma genetika yang terdapat di *software* ETAP pada *tool Optimal Capacitor Placement (OCP)*.

I.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jarak dari pusat pembangkit ke pusat beban?
2. Berapa besar kapasitas kapasitor bank yang terpasang untuk memperbaiki profil tegangan dan meminimalkan rugi daya pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar?
3. Bagaimana pengaruh sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank terhadap nilai tegangan dan rugi daya pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar?

4. Berapa biaya pemasangan kapasitor bank yang paling optimal untuk memperbaiki jatuh tegangan dan meminimalkan rugi daya pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar?

I.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini, yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh jarak dari pusat pembangkit ke pusat beban
2. Untuk mengetahui besar kapasitas kapasitor bank yang terpasang untuk memperbaiki profil tegangan dan meminimalkan rugi daya pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar.
3. Untuk mengetahui pengaruh sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank terhadap nilai tegangan dan rugi daya pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar
4. Untuk mengetahui biaya pemasangan kapasitor bank yang paling optimal pada Sistem Kelistrikan Pulau Selayar.

I.4. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Ruang lingkup dan batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Penelitian ini berfokus pada analisa aliran daya pada kondisi beban tetap (*fixed load*) untuk mendapatkan lokasi pemasangan dan kapasitas kapasitor bank yang optimal.
2. Harmonisa diasumsikan tetap sehingga tidak dibahas pengaruhnya terhadap peralatan maupun sistem proteksi.
3. Tugas akhir ini membahas pengaruh kapasitor bank terhadap profil tegangan dan rugi daya.
4. Software yang digunakan untuk membuat simulasi optimasi pemasangan kapasitor adalah *Optimal Capacitor Placement* pada ETAP 19.0.1.
5. Terbatas pada penyulang di Sistem Kelistrikan 20 kV Pulau Selayar.

I.5. Manfaat Penelitian

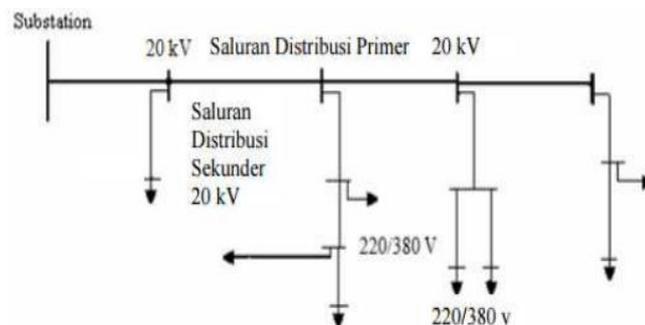
Manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Untuk memberikan informasi mengenai kondisi kelistrikan pada Sistem Kelistrikan 20 kV Pulau Selayar.
2. Untuk menjaga kualitas tegangan pada Sistem Kelistrikan 20 kV Pulau Selayar tetap berada pada tingkat kewajaran berdasarkan standar pada SPLN.
3. Untuk memberikan saran kepada pihak terkait agar mempertimbangkan penggunaan kapasitor bank untuk memperbaiki profil tegangan dan meminimalisir rugi daya pada Sistem Kelistrikan 20 kV Pulau Selayar.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Distribusi

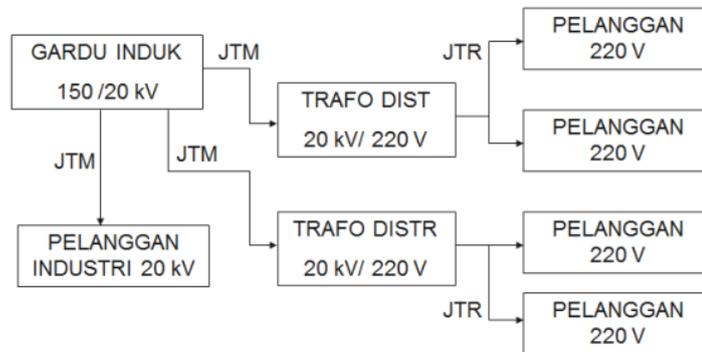
Jaringan distribusi listrik pada sistem daya listrik berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Sistem jaringan distribusi listrik dapat dibedakan menjadi dua, yaitu sistem jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Pada umumnya tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi primer adalah 20 kV, sedangkan tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi sekunder adalah 380/220 volt seperti pada Gambar 1. Untuk menyalurkan daya listrik yang dibutuhkan oleh konsumen memiliki tegangan rendah 380/220 volt dan dipasok dari gardu-gardu distribusi yang bersumber dari jaringan primer (penyulang 20 kV) dan jaringan sekunder (gardu-gardu hubung 20 kV/380 volt). (Dermawan & Nurudin, 2019)



Gambar 1 Diagram satu garis tipikal jaringan distribusi tenaga listrik

Jaringan distribusi tegangan menengah biasanya menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat dengan tegangan antara fasa dengan tanah (netral) 20 kV. Jaringan distribusi merupakan penghubung antar gardu induk tegangan menengah atau yang menghubungkan gardu induk tegangan menengah dengan trafo distribusi tegangan rendah. Jaringan tegangan rendah ada yang menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat untuk beban-beban yang relatif besar. Untuk beban yang relatif kecil termasuk beban rumah tangga lebih banyak menggunakan satu fase 2 kawat dengan tegangan 220 volt dari fasa ke netral. Dalam prakteknya, trafo tegangan yang digunakan mempunyai tiga terminal output, yaitu satu netral yang juga dihubungkan ke tanah dan dua terminal fasa yang mempunyai tegangan sama 220 volt. Untuk pelanggan

yang menggunakan daya cukup besar, misalnya industri, rumah sakit atau kampus biasanya berlangganan dengan tegangan menengah 20 kV. Untuk kepentingan menurunkan tegangan dan pendistribusiannya pihak pelanggan mengelola gardu induk sendiri yang disesuaikan dengan Gambar 2 yang merupakan skema jaringan distribusi secara garis besar.



Gambar 2 Skema jaringan distribusi

Pelanggan beban yang relatif kecil yang menggunakan tegangan rendah dilayani dengan jaringan transmisi tegangan rendah yang menghubungkan pelanggan dengan trafo distribusi tegangan rendah (Suripto, 2016).

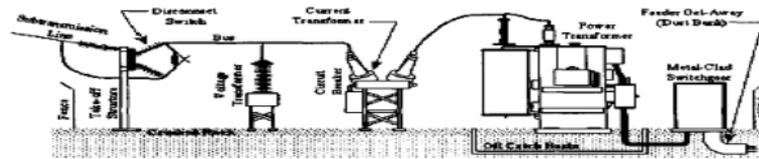
2.1.1 Struktur Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian, yaitu (Suswanto, 2009):

a. Gardu Induk atau Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

Pada bagian ini jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara langsung, maka bagian pertama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah Pusat Pembangkit Tenaga Listrik. Biasanya Pusat Pembangkit Tenaga Listrik terletak di pingiran kota dan pada umumnya berupa Pusat Pembangkit Tenaga Diesel (PLTD). Untuk menyalurkan tenaga listrik ke pusat-pusat beban (konsumen) dilakukan dengan jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

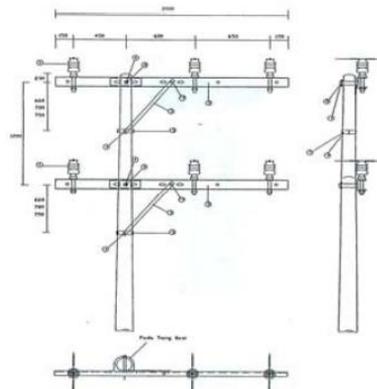
Jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara tak langsung, maka bagian pertama dari sistem pendistribusian tenaga listrik adalah Gardu Induk yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan transmisi dan menyalurkan tenaga listrik melalui jaringan distribusi primer.



Gambar 3 Gardu induk

b. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer merupakan awal penyaluran tenaga listrik dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik ke konsumen untuk sistem pendistribusian langsung. Sedangkan untuk sistem pendistribusian tak langsung merupakan tahap berikutnya dari jaringan transmisi dalam upaya menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki tegangan sistem sebesar 20 kV. Untuk wilayah kota tegangan diatas 20 kV tidak diperkenankan, mengingat pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon.

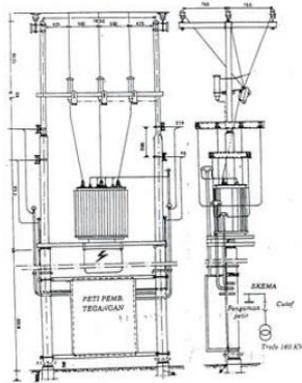


Gambar 4 Jaringan distribusi primer 20 kV

Sifat pelayanan sistem distribusi sangat luas dan kompleks, karena konsumen yang harus dilayani mempunyai lokasi dan karakteristik yang berbeda. Sistem distribusi harus dapat melayani konsumen yang terkonsentrasi di kota, pinggiran kota dan konsumen di daerah terpencil. Sedangkan dari karakteristiknya ada konsumen perumahan dan konsumen dunia industri. Sistem konstruksi saluran distribusi terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan konstruksi tersebut didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut: alasan teknis yaitu berupa persyaratan teknis, alasan ekonomis, alasan estetika dan alasan pelayanan yaitu kontinuitas pelayanan sesuai jenis konsumen.

c. Gardu Pembagi/Gardu Distribusi

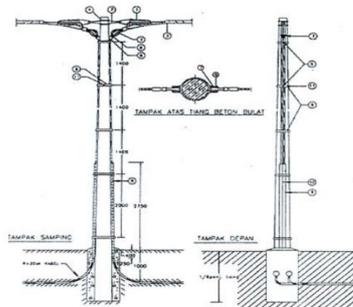
Berfungsi merubah tegangan listrik dari jaringan distribusi primer menjadi tegangan terpakai yang digunakan untuk konsumen dan disebut sebagai jaringan distribusi sekunder. Kapasitas transformator yang digunakan pada Gardu Pembagi ini tergantung pada jumlah beban yang akan dilayani dan luas daerah pelayanan beban. Bisa berupa transformator satu fasa dan bisa juga berupa transformator tiga fasa.



Gambar 5 Gardu distribusi jenis tiang

d. Jaringan Distribusi Sekunder

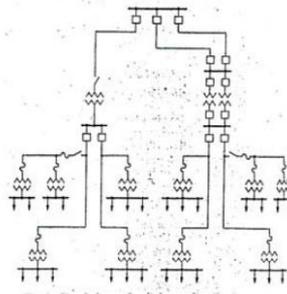
Jaringan distribusi sekunder atau jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) merupakan jaringan tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen. Oleh karena itu besarnya tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini 130/230 V dan 130/400 V untuk sistem lama, atau 230/400 V untuk sistem baru. Tegangan 130 V dan 230 V merupakan tegangan antara fasa dengan netral, sedangkan tegangan 400 V merupakan tegangan fasa dengan fasa.



Gambar 6 Jaringan distribusi sekunder 220 V

2.1.2. Sistem Distribusi Radial

Sistem radial pada jaringan distribusi merupakan sistem terbuka, dimana tenaga listrik yang disalurkan secara radial melalui gardu induk ke konsumen-konsumen dilakukan secara terpisah satu sama lainnya. Sistem ini merupakan sistem yang paling sederhana diantara sistem yang lain dan paling murah, sebab sesuai konstruksinya sistem ini menghendaki sedikit sekali penggunaan material listrik, apalagi jika jarak penyaluran antara gardu induk ke konsumen tidak terlalu jauh. Sistem radial terbuka ini paling tidak dapat diandalkan, karena penyaluran tenaga listrik hanya dilakukan dengan menggunakan satu saluran saja. Jaringan model ini sewaktu mendapat gangguan akan menghentikan penyaluran tenaga listrik cukup lama sebelum gangguan tersebut diperbaiki kembali. Oleh sebab itu kontinuitas pelayanan pada sistem radial terbuka ini kurang bisa diandalkan. Selain itu makin panjang jarak saluran dari gardu induk ke konsumen, kondisi tegangan makin tidak bisa diandalkan, justru bertambah buruk karena rugi-rugi tegangan akan lebih besar. Berarti kapasitas pelayanan untuk sistem radial terbuka ini sangat terbatas (Suswanto, 2009).



Gambar 7 Sistem distribusi radial

2.2. Beban

Beban di dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa yakni beban industri, komersial, dan perumahan. Untuk industri yang sangat besar, kebutuhan bebannya bisa saja dipenuhi langsung oleh saluran transmisi tanpa melalui jaringan distribusi. Sedangkan untuk industri pada umumnya dilayani oleh jaringan distribusi utama. Daerah perumahan biasanya mengonsumsi beban dalam bentuk cahaya, panas, dan pendingin.

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi elektrik ini dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda, sebab hal ini berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut. Karakteristik beban yang banyak disebut dengan pola pembebanan pada sektor perumahan ditunjukkan oleh adanya fluktuasi konsumsi energi elektrik yang cukup besar. Hal ini disebabkan konsumsi energi elektrik tersebut dominan pada malam hari. Sedang pada sektor industri fluktuasi konsumsi energi sepanjang hari akan hampir sama, sehingga perbandingan beban puncak terhadap beban rata-rata hampir mendekati satu. Beban pada sektor komersial dan usaha mempunyai karakteristik yang hampir sama, hanya pada sektor komersial akan mempunyai beban puncak yang lebih tinggi pada malam hari.

Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam (Saadat, 1999):

- a. Beban rumah tangga, pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, alat rumah tangga, seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.
- b. Beban komersial, pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara dan alat – alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran. Beban hotel juga diklasifikasikan sebagai beban komersial (bisnis) begitu juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore.
- c. Beban industri dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari sedangkan industri besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam.
- d. Beban Fasilitas Umum

Beban listrik linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus. Beban linier merupakan beban yang mengeluarkan bentuk gelombang yang berbentuk linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan dimana bentuk gelombang arus sama dengan

bentuk gelombang tegangan. Pada kasus sumber tegangan berbentuk sinusoidal murni, beban linier mengakibatkan arus yang mengalir pada jaringan juga berbentuk sinusoidal murni. Beban linier dapat diklasifikasikan menjadi empat macam, beban resistif, dicirikan dengan arus yang sefasa dengan tegangan; beban induktif murni, dicirikan dengan arus yang tertinggal terhadap tegangan sebesar 90° , beban kapasitif murni, dicirikan dengan arus yang mendahului terhadap tegangan sebesar 90° , dan beban yang merupakan kombinasi dari tiga jenis tersebut, dicirikan dengan arus yang tertinggal/mendahului (Sitorus & Warman, 2013).

2.3. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan atau jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam % atau dalam besaran volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tenaga menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti (Oktaviani dkk, 2019).

Pengaturan tegangan dan jatuh tegangan berdasarkan SPLN 72.1987 adalah:

- 2% dari tegangan kerja sebagaimana tercantum pada ayat 22 bagi sistem yang tidak memanfaatkan Sadapan Tanpa Beban (STB) yaitu sistem spindel dan gugus.
- 5% dari tegangan kerja bagi sistem yang memanfaatkan STB yaitu sistem radial di atas tanah dan sistem simpul.
- Jatuh tegangan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja.
- Jatuh tegangan pada Saluran Tegangan Rendah (STR) dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
- Jatuh tegangan pada sambungan rumah (SR) dibolehkan 1% dari tegangan nominal.

2.4. Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik adalah tenaga listrik yang andal, energi listrik dengan kualitas yang baik dan memenuhi standar, mempunyai kontribusi yang sangat penting bagi kehidupan masyarakat jaman sekarang. Pengertian ini didasarkan dari tiga komponen penting tentang kualitas daya listrik, yaitu (Cruz, 2011):

- a. Kontinuitas: keadaan yang memberikan lamanya waktu bagi konsumen dapat menggunakan energi listrik tanpa terganggu maupun terputus yang dapat memuaskan konsumen, maka pembangkit dan penyaluran tersebut dapat dikatakan memiliki tingkat kualitas daya listrik yang baik.
- b. Level tegangan: tegangan yang baik adalah tegangan yang tetap stabil pada nilai yang telah ditentukan. Walaupun terjadinya fluktuasi (ketidakstabilan) pada tegangan ini tidak dapat dihindarkan, tetapi dapat diminimalkan sesuai variasi tegangan yang dapat diatur dalam suatu standar tertentu.
- c. Efisiensi: nilai yang menunjukkan tingkat penggunaan energi listrik yang dimanfaatkan oleh konsumen secara optimal.

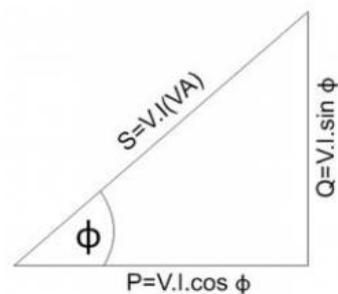
Gangguan kualitas daya secara umum didefinisikan sebagai perubahan pada karakteristik daya (tegangan, arus, atau frekuensi) yang menyebabkan gangguan terhadap operasi normal berbagai peralatan listrik. Ketahanan peralatan yang mengkonsumsi daya listrik akan menentukan derajat kualitas daya yang diperlukan untuk menjamin operasi normal (BPPT, 2012).

2.5. Faktor Daya

Dalam rangkaian listrik, biasanya terdapat tiga macam beban listrik yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Beban resistif adalah beban yang semata-mata terdiri dari resistansi seperti lampu pijar, pemanas, dan lain-lain. Beban ini mempunyai ciri-ciri bahwa daya yang dikonsumsi semata-mata daya nyata. Beban induktif adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililit pada inti besi seperti: motor listrik, transformator, ballast TL, lampu mercury HPL dan lain-lain. Beban ini mengkonsumsi daya nyata dan daya reaktif yang diperlukan untuk muatan magnet dalam beban tersebut (Rofi dan Ferdinand, 2018).

Daya listrik merupakan jumlah energi listrik tiap satuan waktu. Daya listrik dibagi menjadi tiga, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Daya aktif adalah daya yang sebenarnya digunakan oleh konsumen. Daya aktif memiliki satuan Watt. Daya reaktif merupakan daya yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet. Daya reaktif diberi simbol Q, sedangkan satuan daya reaktif adalah VAR (Volt Ampere Reactive). Daya semu merupakan daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik. Daya kompleks / semu diberi simbol (S) dan memiliki satuan VA (Volt Ampere). Daya kompleks / semu terdiri dari daya aktif dan daya reaktif.

Segitiga daya merupakan suatu ilustrasi yang menggambarkan hubungan matematis antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya aktif berada dalam komponen horizontal, daya reaktif berada pada posisi vertikal, sedangkan daya semu merupakan sisi miring pitagoras yang dibentuk antara daya aktif dan daya reaktif (Manggalai dkk, 2018).



Gambar 8 Segitiga daya

Persaman yang digunakan untuk mendapatkan segitiga daya adalah:

$$S = V \times I \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots (2)$$

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (4)$$

Nilai faktor daya ($\cos \varphi$) yang besar, akan berpengaruh pada jaringan primer maupun sekunder. Semakin besar nilai daya reaktif suatu beban, maka makin kecil faktor dayanya. Faktor daya ($\cos \varphi$) *lagging* terjadi pada kondisi dimana arus

tertinggal terhadap tegangan dan keadaan ini dijumpai pada jaringan yang banyak memiliki beban induktif. Sebaliknya faktor daya yang *leading* terjadi pada kondisi dimana arus mendahului tegangan dan keadaan ini dijumpai pada beban kapasitif.

2.6. Perbaikan Faktor Daya

Dalam menentukan kapasitansi kapasitor bank dilakukan terlebih dahulu perhitungan daya reaktif kompensator (Q_c). Pada prinsipnya, dalam perbaikan PF agar nilai $PF \approx 1$, sebuah kapasitor daya ac (kapasitor bank) harus mempunyai nilai daya reaktif kompensator Q_c yang sama dengan nilai daya reaktif Q dari sistem yang akan diperbaiki faktor daya nya, atau dapat ditulis dengan (Dani & Hasanuddin, 2018):

$$Q_c = \frac{v^2}{x_c} \dots\dots\dots (5)$$

Untuk menghitung daya reaktif kompensator yang dibutuhkan terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan, digunakan persamaan:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (6)$$

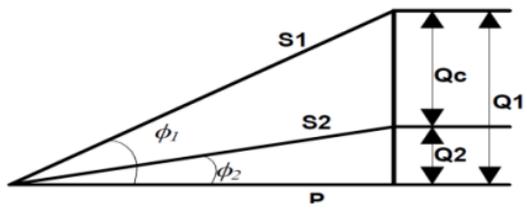
Besarnya nilai daya Q_c kapasitor bank yang diperlukan untuk mengubah faktor daya dari $\cos \phi_1$ menjadi $\cos \phi_2$ dapat ditentukan dengan:

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (Watt)
- Q1 = Daya reaktif awal (VAR)
- Q2 = Daya reaktif yang diinginkan (VAR)
- Qc = Daya reaktif yang diperlukan (VAR)
- ϕ_1 = Sudut faktor daya awal
- ϕ_2 = Sudut faktor daya yang diinginkan

Hubungan perubahan nilai Q dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Prinsip perbaikan faktor daya

2.7. Metode Aliran Daya

Studi aliran daya (*power flow study*) adalah suatu studi yang mempelajari aliran daya pada suatu sistem kelistrikan dari suatu titik ke titik lain dan tegangan pada bus-bus yang berada pada sistem tersebut. Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif, faktor daya dan daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan sistem tenaga listrik pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Studi analisa aliran daya dapat dihitung secara manual maupun menggunakan *software computer*. Tujuan dari studi aliran daya, yaitu (Gama dkk, 2012):

- a. Untuk mengetahui komponen jaringan sistem tenaga listrik pada umumnya.
- b. Mengetahui besarnya tegangan pada setiap bus (*rel*) dari suatu sistem tenaga listrik.
- c. Menghitung aliran-aliran daya, baik daya nyata maupun daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran.
- d. Kerugian-kerugian sistem yang optimum.
- e. Perbaikan dan pergantian ukuran konduktor dan tegangan sistem

Pada sistem multi-rel, penyelesaian aliran daya adalah dengan membentuk Persamaan aliran daya pada sistem. Metode yang digunakan pada umumnya dalam penyelesaian aliran daya, yaitu metode : Newton-Raphson, Gauss-Seidel, dan Fast Decoupled. Tetapi metode yang dibahas pada penelitian ini adalah dengan metode “Newton-Raphson”.

Metode Newton-Raphson secara luas digunakan untuk permasalahan Persamaan non-linear. Penyelesaian Persamaan ini menggunakan permasalahan yang linear dengan solusi pendekatan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk satu Persamaan atau beberapa Persamaan dengan beberapa Variabel yang tidak diketahui.

Langkah-langkah perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson sebagai berikut (Dermawan dkk, 2019):

1. Membentuk matrik admitansi Y_{rel}
2. Menentukan nilai awal $V^{(0)}$, $\delta^{(0)}$, P_{spec} , Q_{spec}

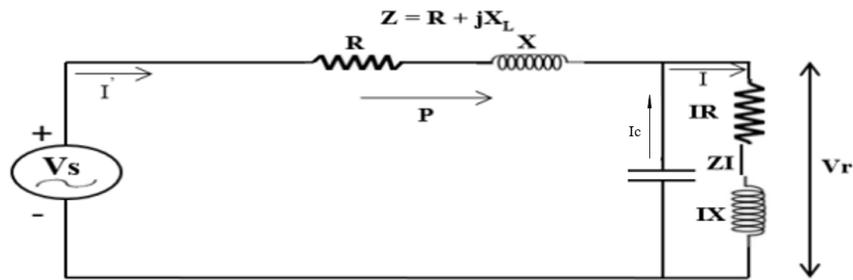
3. Menghitung daya aktif dan daya reaktif
4. Menghitung nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$
5. Membuat matrik Jacobian
6. Menghitung nilai $\Delta \delta_i^{(k+1)}$ dan $\Delta |V|_i^{(k+1)}$
7. Mencari nilai ΔP dan ΔQ , Perhitungan akan konvergen jika nilai ΔP dan $\Delta Q \leq 10^{-4}$
8. Jika sudah konvergen maka perhitungan selesai, jika belum konvergen maka perhitungan dilanjutkan untuk iterasi berikutnya.

Dengan diperolehnya hasil output aliran daya dari sistem dengan metode Newton-Raphson dengan bantuan software ETAP powerstation 19.0.1 yaitu: VAR, tegangan, daya aktif, daya semu, dan $\cos \phi$ merupakan input yang digunakan dalam analisa penempatan optimal kapasitor bank.

2.8. Kapasitor Bank

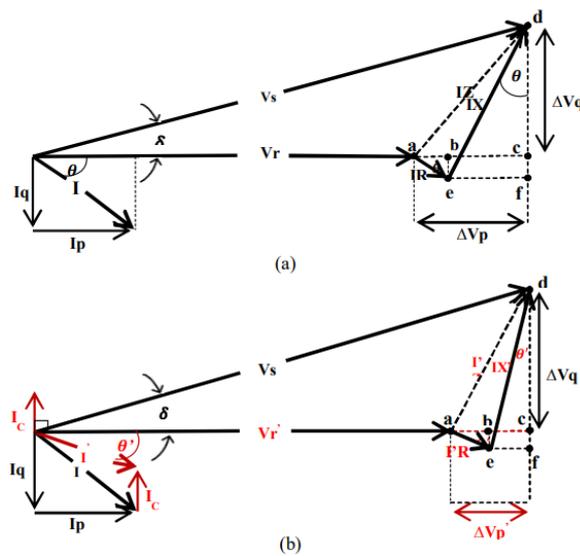
Kapasitor bank (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) dan mengurangi rugi-rugi transmisi. Kapasitor shunt adalah kapasitor yang dihubungkan secara paralel dengan saluran distribusi yang digunakan untuk kompensasi beban induktif dan untuk pengaturan tegangan ujung transmisi. Aplikasi kapasitor shunt akan memperbaiki faktor daya jaringan, mengurangi rugi-rugi (*losses*) jaringan, menetralkan/meniadakan jatuh tegangan dan memperbaiki stabilitas tegangan sehingga dengan kata lain suatu kapasitor shunt akan menaikkan angka efisiensi pada jaringan dengan memperbaiki faktor daya.

Pembangkit daya reaktif pada perencanaan daya dan penyalurannya ke beban yang berjarak jauh adalah tidak ekonomis, tetapi dapat dengan mudah disediakan oleh kapasitor shunt yang ditempatkan pada pusat beban. Kapasitor shunt pada jaringan (Gambar 10) dapat menyuplai daya reaktif negatif yang dapat berpengaruh untuk mengurangi daya aliran reaktif di dalam jaringan sehingga dapat merubah karakteristik arus lagging dari beban reaktif induktif menjadi arus leading (Manurung dkk, 2017).



Gambar 10 Rangkaian ekivalen saluran dengan kapasitor shunt

Maka, dengan dipasang kapasitor shunt pada saluran sisi penerima, dengan arus kapasitif (I_c) dengan komponen arus reaktif yang leading 90° terhadap tegangan, maka drop tegangan dapat diturunkan, seperti pada gambar berikut.



Gambar 11 Diagram Phasor (a). Saluran Tanpa Kapasitor Shunt
(b). Saluran Dengan Kapasitor Shunt

Pada rangkaian ekivalen saluran tanpa menggunakan kapasitor shunt dengan faktor daya lagging memiliki persamaan drop tegangan berikut:

$$\Delta V_p = IR \cos\theta + IX \sin\theta \dots\dots\dots (8)$$

Maka setelah ditambahkan dengan dengan kapasitor shunt, nilai drop tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta V_{p'} = IR \cos\theta' + (I_L X_L - I_C X_C) \sin\theta' \dots\dots\dots (9)$$

Atau persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{aligned} \Delta V_p &= IR \cos\theta' + (I_L X_L - I_C X_C) \sin\theta' \\ &= IR \cos\theta' + (I_L X_L \sin\theta' - I_C X_C \sin\theta') \end{aligned}$$

$$= R \left(\frac{P}{V_{r'}} \right) + X_L \left(\frac{Q_L}{V_{r'}} \right) - X_C \left(\frac{Q_C}{V_{r'}} \right)$$

$$\Delta V_p = R \left(\frac{P}{V_{r'}} \right) + \frac{Q_L X_L - Q_C X_C}{V_{r'}} \dots \dots \dots (10)$$

dengan keterangan gambar dan persamaan:

V_s ' = Tegangan dari sisi pengirim

V_r ' = Tegangan pada sisi penerima

R = Resistansi saluran

X = Reaktansi saluran

X_L = Reaktansi Induktif

X_C = Reaktansi Capacitif

I_p = Komponen arus aktif

I_q = Komponen arus reaktif induktif

IR = Komponen real arus

IX = Reaktansi jaringan

P = Daya aktif yang dikirimkan ke beban

Q = Daya reaktif yang dikirimkan ke beban

Ketika dipasang kapasitor shunt, terjadi injeksi arus I_C pada sistem sehingga faktor daya meningkat dan I_L berkurang. Hal ini mengakibatkan drop tegangan berkurang ($I_L X_L$) sehingga V_r meningkat. Pernyataan ini seperti dijelaskan pada Gambar 11

(a) sehingga dapat dituliskan persamaan sebagai berikut:

$$V_r = V_s - (IR + jIX) \dots \dots \dots (11)$$

$$V_{r'} = V_s - (IR + jI_L X_L - jI_C X_C) \dots \dots \dots (12)$$

$$\Delta V_r = V_{r'} - V_r$$

$$= [V_s - (IR + jI_L X_L - jI_C X_C)] - [V_s - (IR + jI_L X_L)]$$

$$= jI_C X_C \dots \dots \dots (13)$$

Batas penurunan tegangan maksimum pada beban penuh yang diijinkan di beberapa titik sambung pada jaringan distribusi adalah : Tegangan sistem distribusi harus dijaga pada batas-batas kondisi normal yaitu $\pm 5\%$ dari tegangan nominal.

2.9. Rugi-Rugi pada Sistem Distribusi

Rugi-rugi daya listrik pada sistem distribusi dipengaruhi beberapa faktor yang antara lain faktor konfigurasi dari sistem jaringan distribusi, transformator, kapasitor, isolasi. Rugi-rugi daya listrik pada saluran distribusi dapat dikategorikan menjadi 2 (dua) bagian yaitu rugi-rugi daya aktif dan daya reaktif seperti persamaan di bawah ini (Akto dkk, 2014):

$$S_{loss} = P_{loss} \pm jQ_{loss} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana :

P_{loss} = Rugi-rugi daya aktif (Watt)

Q_{loss} = Rugi-rugi daya reaktif (VAr)

S_{loss} = Total rugi saluran (VA)

2.10. Analisa Penempatan Kapasitor Bank

Terdapat berbagai macam cara untuk menganalisa penempatan optimal kapasitor bank pada sistem distribusi radial untuk kompensasi daya reaktif salah satunya adalah dengan metode “Genetik Algorithm”.

Penempatan optimal kapasitor bank pada sistem distribusi radial untuk menjaga kualitas Tegangan dan kompensasi daya reaktif adalah dengan metode “algoritma genetika”. Tujuan dari metode ini adalah untuk menentukan rating VAR dan lokasi penempatan optimal kapasitor bank serta biaya (cost) atau VARnya pada sistem distribusi radial.

Algoritma genetika (GA) adalah suatu metode yang meniru mekanisme pada proses evolusi. Proses evolusi ini dilakukan pada sekumpulan kandidat solusi (*chromosome*) dengan mengikuti prinsip seleksi natural yang dikembangkan oleh Darwin. Pada algoritma biasa dimana pencarian solusi hanya dimulai dengan satu solusi yang mungkin inilah yang membedakan dengan GA, GA melakukan pencarian sekaligus atas sejumlah kandidat solusi yang dikenal dengan istilah populasi masing-masing kromosom pada GA terdiri dari sejumlah bilangan atau simbol yang merepresentasikan suatu solusi yang layak (*feasible solution*) dari persoalan. Selanjutnya, *chromosome* untuk generasi berikutnya diperoleh dengan melakukan operasi genetika (*Crossover* dan Mutasi). Tujuan operasi genetika ini

dilakukan agar mendapatkan hasil sejumlah chromosome baru (*offspring*) yang dapat memberikan solusi lebih baik. Untuk setiap chromosome populasi dievaluasi dengan menghitung nilai fitness (*fitness value*). fitness value yang biasa dipakai dari salah satu adalah dengan menghitung nilai fungsi tujuan (*objective value*) (Dermawan dkk, 2019).

2.11. *Electric Transient and Analysis Program (ETAP)*

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi nyata sebelum sebuah sistem direalisasikan. *Electric Transient and Analysis Program (ETAP) PowerStation* merupakan salah satu software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. ETAP mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, dan *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik (Lesnato & Aridani, 2013).

2.12. *Optimal Capacitor Placement (OCP)*

Optimal Capacitor Placement (OCP) merupakan salah satu *tool* di dalam software ETAP yang menggunakan algoritma genetika untuk penempatan kapasitor yang optimal. Algoritma genetika adalah suatu teknik optimasi yang didasarkan pada teori seleksi alam. Sebuah algoritma dimulai dengan generasi solusi dengan keanekaragaman untuk mewakili karakteristik dari ruang pencarian secara keseluruhan. Dengan mutasi dan *crossover* karakteristik yang baik dipilih untuk dibawa ke generasi berikutnya. Solusi optimal dapat dicapai melalui generasi berulang. Metode yang paling umum berdasarkan aturan praktis diikuti dengan menjalankan studi beberapa aliran daya untuk *fine-tuning* ukuran dan lokasi (Abimanyu, 2019).

2.13. Metode *Net Present Value* (NPV)

Sebelum melakukan investasi, perlu dilakukan studi kelayakan untuk memperkirakan apakah investasi yang dilakukan layak atau tidak. Salah satunya ditinjau dari sisi ekonomis dengan menggunakan beberapa metode penilai seperti metode *Net Present Value* yang bisa dipakai untuk penilaian kelayakan suatu investas. *Net Present Value* (NPV) adalah selisih antara *present value* dari investasi dengan nilai sekarang dari penerimaan-penerimaan kas bersih di masa yang akan datang. Untuk menghitung nilai sekarang perlu ditentukan tingkat suku bunga yang relevan. Analisa NPV dapat diketahui dengan rumus (Saputra dkk, 2016):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^n} - I_0 \dots\dots\dots (15)$$

$$DF = \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+r)^n} \dots\dots\dots (16)$$

Dimana:

NPV = *Net Present Value*

DF = *Discount Factor*

I_0 = Nilai investasi awal

CF_t = Keuntungan yang didapatkan

t = tahun ke-

r = suku bunga

n = jumlah tahun

2.14. Penelitian Terkait Sebelumnya

Terkait dengan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai bahan referensi penulis untuk melakukan penelitian dan penyelesaian tugas akhir ini, yaitu:

1. Analisa penempatan optimal bank kapasitor pada sistem distribusi radial dengan metode genetik algorithm dengan studi kasus PT. PLN (PERSERO) Cabang Medan. Dalam penelitian tersebut menyimpulkan bahwa agar tegangan kerja sistem dapat mencapai $\geq 95\%$ dari tegangan nominal, maka diperlukan kapasitor bank dengan kapasitas 1600 kVAR yang ditempatkan pada bus: 1272; 1397; 1478, dan 1486 dengan masing-masing berkapasitas 400 kVAR. (Universitas Sumatera Utara, 2011)

2. Optimasi penempatan kapasitor pada sistem tegangan menengah regional Jawa Barat. Dalam penelitian tersebut menyimpulkan bahwa lokasi penempatan kapasitor paling optimal dengan metode fuzzy logic algoritma genetika yaitu pada bus 11 dengan kapasitas 86,986 MVAR dan bus 12 berkapasitas 44,347 MVAR. Sehingga dapat memperbaiki sebesar 5,18% dari 0,945 pu menjadi 0,994 pu pada bus 11 dan 6,23% dari 0,930 pu menjadi 0,988 pu pada bus 12. Serta persentase penurunan rugi daya aktif dan reaktif setelah pemasangan kapasitor sebesar 4,868% dan 5,973%. (Universitas Kristen Maranatha, 2019)
3. Meminimasi rugi daya pada jaringan distribusi radial 3 fasa menggunakan genetika algoritma untuk mendapatkan lokasi kapasitor dan DG yang optimal. Dalam penelitian ini menyimpulkan dengan menggunakan sistem distribusi radial IEEE 33 bus didapat penempatan 3 kapasitor pada bus 25, 30, dan 12 dan 3 buah DG pada bus 7, 30, dan 14. Dari penempatan didapatkan persentase penurunan rugi daya sebesar 92,63%. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015)
4. Implementasi penempatan kapasitor shunt untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi PT. PLN Sumbawa Besar menggunakan *software* ETAP 12.6. Dalam penelitian ini menyimpulkan bahwa dengan melakukan pemasangan kapsitor bank pada bus 11 dengan kapasitas 1.500 kVAR, bus 50 dengan kapasitas 2.700 kVAR, bus 68 dengan kapasitas 2.400 kVAR, bus 69 dengan kapasitas sebesar 2.700 kVA, dan bus 99 dengan kapasitas 2.400 kVAR dapat membuat profil tegangan sistem meningkat yang sebelumnya mengalami kritikal. Seluruhnya dapat ditingkatkan pada batas margin yang diizinkan yaitu lebih dari 0,95 p.u dan kurang dari 1,05 p.u. Sedangkan rugi-rugi daya dapat direduksi menjadi 207,825 kW dan 221,377 kVAR. (Institut Teknologi Nasional Malang, 2016)
5. Optimasi penempatan kapasitor bank menggunakan algoritma genetika untuk mengurangi rugi daya pada sistem distribusi daya listrik dengan studi kasus PT. PLN Rayon Bintan Center. Dalam penelitian ini menyimpulkan Algoritma Genetika mendekati hasil optimum yaitu terjadi penghematan mencapai Rp. 9,892,815,215 atau sekitar 27% dengan penempatan 6 kapasitor bank yang berbeda-beda. (Universiyas Maritim Raja Ali Haji, 2020)