

SKRIPSI

**STUDI OPTIMASI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM
SULBAGSEL DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA**

Disusun dan diajukan oleh :

JASMARANI

D041 20 1022



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI OPTIMASI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA

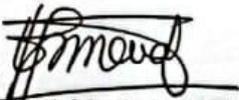
Disusun dan diajukan oleh

Jasmarani
D041201022

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 16 Oktober 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

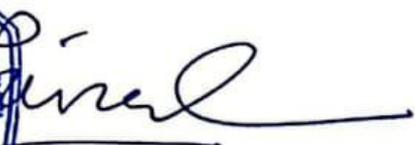
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. If. Zhenab Muslimin, M.T.
NIP. 196602011992022002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Jasmarani
NIM : D041201022
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI OPTIMASI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA

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

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

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

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

Gowa, 10 Oktober 2024

Yang Menyatakan


Jasmarani

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT., karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “ **STUDI OPTIMASI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA**”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk dapat menyelesaikan pendidikan tahap sarjana di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa selama penyusunan skripsi ini, penulis banyak dihadapi dengan berbagai hambatan, namun berkat adanya bimbingan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ibu Masrian dan Bapak Jufri selaku kedua orang tua penulis yang selalu menjadi alasan bertahan untuk setiap proses yang dialami penulis. Penulis sadari untuk setiap hasil yang dicapai sampai saat ini tidak lepas dari restu dan doa yang tiada henti serta dukungan moral maupun materil. Juga kakak-kakak penulis Jumriani, Mariani, dan Muh. Yusril Mahendra yang juga selalu mendokan dan mendukung penulis.
2. Ketua Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
3. Ibu Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T. selaku dosen pembimbing penulis yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya selama membimbing dan mengarahkan penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM dan Bapak Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., MCE., IPM., Ph.D. selaku dosen penguji telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran, koreksi, dan arahan dalam penyelesaian tugas akhir penulis.

5. Segenap Dosen dan Staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan ilmu selama perkuliahan dan membantu kelancaran proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Keluarga besar UKM KCT Elektroteknik UNHAS yang menjadi tempat penulis untuk mengembangkan bakat dan belajar hal baru. Terima kasih banyak untuk setiap KRI yang kita hadapi bersama, terkhusus kepada Tim Punggawana yang telah mengajarkan saya apa arti saling memahami, bekerja sama, pantang menyerah, dan selalu memacu diri untuk setiap target yang ada.
7. Teman-teman Lab Riset Relay dan Pengukuran angkatan 2020 yang akan selalu jadi part indah dimasa perkuliahan. Terima kasih untuk segala momen kebersamaan yang diciptakan serta semua dukungan yang diberikan.
8. Teman-teman PROCEZ20R yang telah kebersamai sejak maba hingga kini.
9. Kepada Inna, Sindy, Isti, Faizah, dan lebih terkhusus lagi Muliati Idris yang senantiasa bersama disetiap fase dan dinamika perkuliahan. Saling mendukung saat masa lab yang sangat padat, belajar bersama saat ada tugas, dan saling support hingga kini.
10. Kepada Ayu Syahrani dan keluarga yang telah menjadi rumah kedua dalam perantauan penulis, tidak pernah terfikirkan bisa bertemu orang-orang sebaik ini yang bahkan tidak ada hubungan darah.
11. Dan untuk semua pihak yang tak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

ABSTRAK

JASMARANI. Studi Optimasi Penempatan STATCOM pada Sistem SULBAGSEL dengan Metode Algoritma Genetika

Penempatan STATCOM pada sistem transmisi SULBAGSEL merupakan salah satu cara untuk mengatasi ketidakstabilan tegangan akibat daya output PLTA Poso yang dipengaruhi oleh alam. Selain untuk menjaga kestabilan tegangan pemasangan ini juga dimaksudkan untuk mengurangi total rugi-rugi daya. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lokasi dan rating STATCOM yang optimal untuk dipasang pada sistem SULBAGSEL. Metode yang digunakan dalam penentuan ini yaitu Algoritma Genetika, yang mana metode ini merupakan adaptasi dari evolusi makhluk hidup untuk memperbaiki individu di populasinya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi sebelum pemasangan STATCOM total rugi daya aktif sistem yaitu 38.678 MW dan daya reaktif 72.725 MVar, setelah pemasangan STATCOM pada bus 60 dengan rating 155 MVar total rugi dayanya turun menjadi 36.359 MW dan 61.039 MVar. Simulasi ini dilakukan dengan 5 skenario. Pertama saat kondisi awal, kedua saat daya output PLTA Poso 0%, ketiga saat daya output PLTA Poso 25%, keempat saat daya output PLTA Poso 50%, dan kelima saat daya output PLTA Poso 100%. Dari beberapa skenario ini didapatkan bahwa dengan pemasangan STATCOM dapat mengurangi total rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan.

Kata Kunci : STATCOM, SULBAGSEL, Genetika Algoritma Rugi-Rugi Daya, Tegangan.

ABSTRACT

JASMARANI. *Study of STATCOM Placement Optimization in SULBAGSEL System with Genetic Algorithm Method*

The placement of STATCOM in the SULBAGSEL transmission system is one way to address voltage instability caused by the output power of the Poso Hydropower Plant, which are influenced by environmental conditions. In addition to maintaining voltage stability, the installation is also aimed at reducing total power losses. This study aims to determine the optimal location and rating of STATCOM to be installed in the SULBAGSEL system. The method used for this determination is the Genetic Algorithm, which is an adaptation of the evolution of living organisms to improve individuals within a population. The simulation results show that before the STATCOM installation, the total active power loss in the system was 38.678 MW and the reactive power loss was 72.725 MVar. After installing STATCOM at bus 60 with a 155 MVar rating, the total power loss decreased to 36.359 MW and 61.039 MVar. The simulation was conducted across five scenarios. The first scenario was the initial condition, the second scenario involved a 0% power output from the Poso Hydropower Plant (compared to the initial condition), the third scenario a 25% output, the fourth a 50% output, and the fifth a 100% output. From these scenarios, it was concluded that the installation of STATCOM effectively reduces total power losses and improves voltage profiles.

Keywords: STATCOM, SULBAGSEL, Genetic Algorithm, Power Loss, Voltage.

DAFTAR ISI

SKRIPSI	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	6
2.3 <i>Static Synchronous Compensator (STATCOM)</i>	8
2.4 Algoritma Genetika	12
2.5 Stabilitas Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik	16
2.6 MATLAB (<i>Matrix Laboratory</i>)	20
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	22
3.2 Alat dan Bahan	22
3.3 Pengambilan Data	22
3.3.1 Data Bus	22
3.3.2 Data Saluran.....	27
3.3.2 <i>Single Line Diagram</i>	29
3.4 Diagram Alir Penelitian	30
3.5 Metode Analisis Data	31

3.6	Perencanaan Simulasi.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		38
4.1	Simulasi Saat Kondisi Awal.....	38
4.1.1	Simulasi Saat Kondisi Awal Sebelum Pemasangan STATCOM	38
4.1.2	Simulasi Saat Kondisi Awal Setelah Pemasangan STATCOM	40
4.2	Simulasi Saat Daya Output PLTA Poso 0%	42
4.3	Simulasi Saat Daya Output PLTA Poso 25%	44
4.4	Simulasi Saat Daya Output PLTA Poso 50%	46
4.5	Simulasi Saat Daya Output PLTA Poso 100%.....	49
4.6	Simulasi Skenario Pemasangan pada Bus 56.....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		58
5.1	Kesimpulan.....	58
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA		60
LAMPIRAN.....		62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik Sederhana	5
Gambar 2. STATCOM sistem. (a) VSC terhubung paralel dengan sistem kelistrikan melalui transformer. (b) Rangkaian ekivalen.....	9
Gambar 3. Prinsip Kerja pada Sistem STATCOM	10
Gambar 4. Operasi dasar dari VSC: (a) VSC dihubungkan dengan bus sistem. Diagram vektor yang merepresentasikan (b) operasi lagging (c) operasi leading.....	10
Gambar 5. Karakteristik V-I STATCOM	12
Gambar 6. Single Line Diagram dari STATCOM dan Diagram Blok Sistem Kontrolnya.....	12
Gambar 7. Ilustrasi istilah dalam Algoritma Genetika.....	14
Gambar 8. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	18
Gambar 9. Single Line Diagram Kelistrikan Sistem SULBAGSEL	29
Gambar 10. Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 11. Diagram Alir Optimasi Menggunakan Algoritma Genetika	31
Gambar 12. Grafik perbandingan nilai tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada kondisi awal sistem.....	41
Gambar 13. Grafik perbandingan nilai tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada saat daya output PLTA Poso 0%	44
Gambar 14. Grafik perbandingan nilai tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada saat daya output PLTA Poso 25%	46
Gambar 15. Grafik perbandingan nilai tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada saat daya output PLTA Poso 50%	48
Gambar 16. Grafik perbandingan nilai tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada saat daya output PLTA Poso 100%	51

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data Nominal Bus dan Tipe Bus.....	23
Tabel 2 Data Pembangkitan dan Beban Sistem Kelistrikan SULBAGSEL	25
Tabel 3 Data Saluran Transmisi Sistem Kelistrikan SULBAGSEL	27
Tabel 4 Profil Tegangan Kondisi Normal Sebelum Pemasangan STATCOM.....	39
Tabel 5 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Kondisi Awal.....	40
Tabel 6 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Saat Daya Output PLTA Poso 0%	42
Tabel 7 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Saat Daya Output PLTA Poso 25%	45
Tabel 8 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Saat Daya Output PLTA Poso 50%	47
Tabel 9 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Kondisi Daya Output 100%	49
Tabel 10 Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM pada Bus 56	52
Tabel 11 Nilai Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM Pada Tiap Bus	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi Baru Terbarukan (EBT) merupakan strategi utama pemerintah Indonesia dalam mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional yang masih menggunakan fosil. Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi salah satu solusi yang sangat mungkin dilakukan dalam upaya pengendalian perubahan iklim, selain itu emisi karbon yang dihasilkan sangat minim bahkan tidak sama sekali. Hal ini dapat menyelesaikan permasalahan terkait perubahan iklim tersebut.

Pemerintah Indonesia, terus terlibat aktif dalam memenuhi *Paris Agreement*. Dalam hal ini, Indonesia berkomitmen di sektor energi untuk dapat menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sesuai dengan *Nationally Determined Contributions/NDC* pada tahun 2030 sebesar 29% dari *Business as Usual* (BaU) dengan kemampuan sendiri dan 41% dengan dukungan Internasional. Saat ini komitmen untuk mengatasi perubahan iklim disikapi dengan roadmap menuju *Net Zero Emission* (NZE). Bentuk dukungan Indonesia dapat dilihat dengan diterbitkannya Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2021-2030 dengan memperbesar porsi pembangkit Energi Baru Terbarukan (EBT). Target bauran EBT dalam Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) adalah 23% pada tahun 2025 (ESDM, 2021).

Diantara beberapa pembangkit EBT yang ada di sistem kelistrikan SULBAGSEL, PLTA merupakan pembangkit dengan pemasok terbesar contohnya seperti PLTA Bakaru, PLTA Malea, PLTA Poso, dan lain-lain. Sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (SULBAGSEL) memiliki potensi besar dalam pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) karena kekayaan alam dan topografi wilayahnya yang mendukung. Sulawesi Selatan dikenal memiliki banyak sungai besar dengan aliran air yang stabil, menjadikannya salah

satu wilayah yang sangat potensial untuk pengembangan energi air sebagai sumber listrik.

Namun, meskipun PLTA menawarkan manfaat lingkungan yang signifikan, integrasi sumber energi ini ke dalam jaringan kelistrikan juga membawa tantangan teknis yang serius, terutama terkait kestabilan tegangan. Pengaruh alam seperti musim kemarau dapat mempengaruhi debit air dalam produksi energi yang dapat menyebabkan variasi tegangan yang signifikan dalam jaringan, yang tentunya dapat mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan. Selain pengaruh alam, pengaruh teknis juga akan sangat mempengaruhi seperti saat terjadi kerusakan di salah satu komponen. Untuk mengatasi masalah ini, solusi seperti pemasangan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada sistem bisa menjadi pilihan. STATCOM adalah perangkat elektronik yang dapat menghasilkan daya reaktif secara instan untuk mengkompensasi fluktuasi tegangan dalam jaringan, sehingga mempertahankan kestabilan tegangan dalam batas yang diinginkan.

Implementasi STATCOM tidak semata-mata tentang memasang perangkat ini di lokasi yang dipilih secara acak dalam jaringan, penting untuk melakukan optimasi pemasangan STATCOM dengan cermat. Studi optimasi pemasangan STATCOM pada sistem kelistrikan khususnya di sistem SULBAGSEL yang memiliki banyak pembangkit EBT perlu untuk diteliti lebih lanjut karena beberapa alasan. Pertama, optimasi pemasangan STATCOM dapat membantu mengurangi risiko gangguan pada peralatan listrik dan meningkatkan kualitas daya yang disediakan kepada pelanggan. Kedua, dengan mengurangi fluktuasi tegangan, penggunaan STATCOM dapat berkontribusi pada efisiensi operasional keseluruhan sistem kelistrikan, serta meminimalkan kerugian energi yang terjadi. Ketiga, penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan wawasan bagi pengembangan infrastruktur kelistrikan yang berkelanjutan di Indonesia, terutama dalam hal mengintegrasikan sumber energi terbarukan ke dalam jaringan yang ada.

Oleh karena itu, studi tentang optimasi pemasangan STATCOM dalam konteks sistem kelistrikan SULBAGSEL dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang cara memanfaatkan teknologi ini secara efektif untuk mengatasi

tantangan kestabilan tegangan yang muncul akibat pengaruh alam terhadap PLTA. Hal ini menjadikan dasar dalam penulisan tugas akhir yang berjudul “**Studi Optimasi Penempatan STATCOM pada Sistem SULBAGSEL dengan Metode Algoritma Genetika**”.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana menentukan lokasi dan kapasitas optimal pemasangan STATCOM pada sistem SULBAGSEL dengan metode Algoritma Genetika?
2. Berapa besar rugi-rugi daya sistem sebelum dan setelah penempatan STATCOM ?
3. Bagaimana pengaruh penempatan STATCOM dalam beberapa variasi daya output PLTA Poso ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menentukan lokasi dan kapasitas optimal penempatan STATCOM pada sistem SULBAGSEL dengan metode Algoritma Genetika.
2. Menentukan besar rugi-rugi daya sistem sebelum dan setelah penempatan STATCOM.
3. Menentukan pengaruh penempatan STATCOM dalam beberapa variasi daya output PLTA Poso.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Teoritis : Hasil penelitian ini akan berguna dalam pengembangan teori-teori terkait kestabilan sistem tenaga.

2. Manfaat Praktis : Hasil penelitian ini dapat dijadikan pertimbangan bagi PT PLN (Persero) sebagai salah satu bentuk upaya dalam menjaga kestabilan tegangan sistem.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

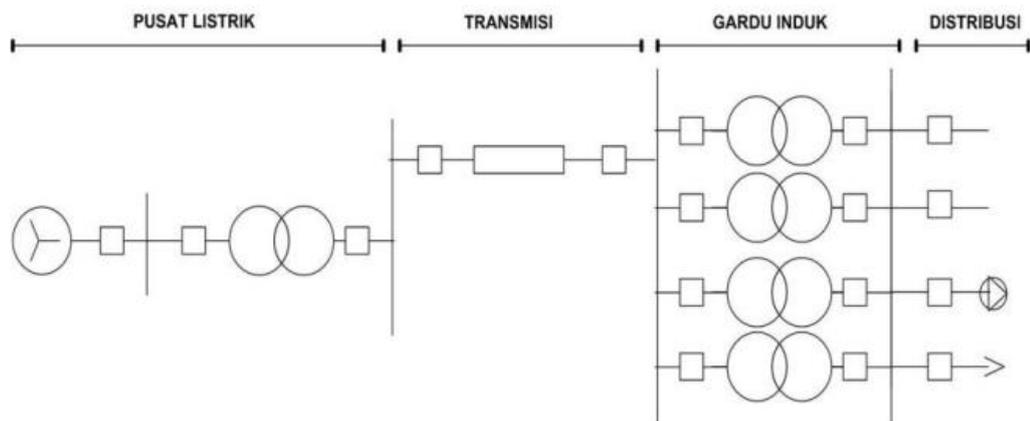
1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem jaringan transmisi SULBAGSSEL.
2. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Matlab R2023a*.
3. Analisis aliran daya dilakukan hanya dalam kondisi *stady state* dan kondisi sesaat.
4. Hanya melakukan analisis untuk kestabilan tegangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan sebuah kesatuan interkoneksi. Energi listrik dibangkitkan oleh pusat-pusat listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTP. Kemudian energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke beban-beban melalui saluran distribusi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik Sederhana
Sumber : (Machfuadiah, 2019)

Pada sistem yang besar, tegangan keluaran generator dinaikkan menjadi tegangan transmisi yaitu berupa tegangan tinggi (TT) ataupun tegangan ekstra tinggi (TET) untuk memperkecil rugi-rugi daya yang terjadi dengan menggunakan transformator *step up*. Setelah energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka energi listrik menuju ke Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya menjadi tegangan menengah (TM) menggunakan transformator *step down*.

Setelah dari GI maka energi listrik akan disalurkan melalui jaringan distribusi primer pada level tegangan menengah, kemudian kembali diturunkan tegangannya pada gardu distribusi menjadi tegangan rendah dan akhirnya

disalurkan melalui jaringan distribusi sekunder kepada konsumen (Machfudiah, 2019).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah salah satu pembangkit listrik yang mengandalkan energi potensial dan kinetik dari air untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan dari hal ini disebut sebagai hidroelektrik. Empat komponen utama dari PLTA adalah adanya waduk atau bendungan, saluran pelimpah (pembawa air), gedung sentral (*powerhouse*), dan serandang hubung (*switchyard*) atau unit transmisi yang mengalirkan produksi listrik ke konsumen.

Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah motor yang dihubungkan dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari air. Namun, secara luas pembangkit listrik tenaga air tidak hanya terbatas pada air dari sebuah waduk maupun air terjun, melainkan juga meliputi pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air dalam bentuk apapun. (Zakir, L. M., 2019)

Potensi tenaga air didapat pada sungai yang mengalir di daerah pegunungan. Untuk dapat memanfaatkan potensi dari sungai ini, maka kita perlu membendung sungai tersebut dan airnya disalurkan ke bangunan PLTA. PLTA sendiri memiliki 5 jenis (Arismunandar dan Kuwahara, 2004), yaitu sebagai berikut.

1. PLTA Jenis Bendungan

PLTA memanfaatkan bendungan yang melintang di sungai untuk menaikkan permukaan air di bagian hulu sungai guna membangkitkan energi potensial yang lebih besar sebagai pembangkit listrik.

2. PLTA Berdasarkan Aliran Sungai

PLTA jenis aliran sungai langsung (*run of river*) banyak dipakai dalam PLTA saluran air/terusan. Jenis ini membangkitkan listrik dengan memanfaatkan aliran sungai itu sendiri secara alamiah. Air sungai dialihkan dengan

menggunakan bendungan yang dibangun memotong aliran sungai. Air sungai ini kemudian disalurkan ke bangunan air PLTA.

3. PLTA Dengan Kolam Pengatur (*Regulating Pond*)

Pembangkit listrik jenis ini dibuat dengan cara mengatur aliran sungai setiap hari atau setiap minggu dengan menggunakan kolam pengatur yang dibangun melintang sungai dan membangkitkan listrik sesuai dengan beban.

4. Pusat Listrik Jenis Waduk (*Reservoir*)

Pembangkit listrik jenis ini dibuat dengan cara membangun waduk yang melintang sungai, sehingga terbentuk seperti danau buatan, atau dibuat dari danau asli sebagai penampung air hujan untuk cadangan musim kemarau. Pada PLTA dengan waduk, air sungai dibendung dengan bendungan besar agar terjadi penimbunan air sehingga terjadi kolam tando. Selanjutnya air di kolam tando disalurkan ke bangunan air PLTA. Dengan adanya penimbunan air terlebih dahulu dalam waduk, maka pada musim hujan di mana debit air sungai besarnya melebihi kapasitas penyaluran air bangunan air PLTA, air dapat ditampung dalam kolam tando. Pada musim kemarau di mana debit air sungai lebih kecil daripada kapasitas penyaluran air bangunan PLTA, selisih kekurangan air ini dapat diatasi dengan mengambil air dari timbunan air yang ada dalam waduk. Inilah keuntungan penggunaan waduk pada PLTA

5. PLTA Jenis Pompa (*Pumped Storage*)

PLTA memanfaatkan tenaga listrik yang berlebihan ketika musim hujan atau pada saat pemakaian tenaga listrik berkurang saat tengah malam. Pada waktu ini sebagian turbin berfungsi untuk memompa air di hilir ke hulu. Jadi pembangkit ini memanfaatkan kembali air yang dipakai saat beban puncak dan dipompa ke atas lagi saat beban puncak terlewati.

PLTA bekerja dengan cara mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik untuk menggerakkan motor dari energi mekanik menjadi energi listrik dengan bantuan generator (Arismunandar dan Kuwahara, 2004). Turbin berfungsi untuk mengubah energi potensial menjadi energi mekanik. Air akan memukul sudut-sudut dari turbin sehingga turbin berputar. Perputaran turbin ini dihubungkan ke generator. Generator dihubungkan ke turbin dengan bantuan

poros dan gearbox. Memanfaatkan perputaran turbin untuk memutar kumparan magnet yang ada didalam generator sehingga terjadi pergerakan elektron yang membangkitkan arus AC.

2.3 *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*

Static Synchronous Compensator (STATCOM) merupakan kompensator daya reaktif yang dihubungkan paralel dengan kemampuan mensuplai atau menyerap daya reaktif dimana outputnya dapat bervariasi untuk mengontrol parameter tertentu pada sistem tenaga listrik. STATCOM dianalogikan seperti mesin sinkron ideal, yang menghasilkan tiga tegangan sinusoidal, dengan amplitudo dan sudut fasa yang dapat diatur. Mesin ideal ini tidak memiliki inertia dan dapat menghasilkan daya reaktif (kapasitif maupun induktif).

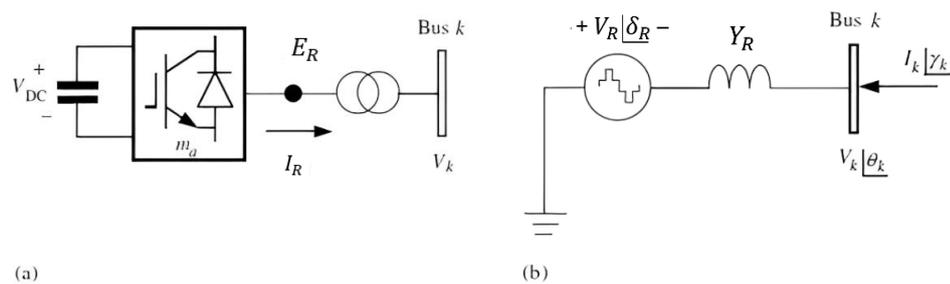
STATCOM memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya sangat efektif dalam menjaga stabilitas dan kualitas tegangan sistem kelistrikan. Salah satu keunggulan utama STATCOM adalah respons dinamisnya yang sangat cepat dalam menghasilkan daya reaktif, bahkan dalam kondisi yang tiba-tiba berubah, seperti saat terjadi fluktuasi tegangan akibat perubahan beban atau variasi produksi daya dari pembangkit. Respons ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan kapasitor statis yang responsnya lebih lambat dan terbatas pada kondisi tertentu saja. Selain itu, STATCOM memiliki kemampuan beroperasi pada tegangan rendah dengan tetap memberikan kompensasi reaktif yang efektif, sesuatu yang tidak bisa dicapai oleh kapasitor konvensional.

STATCOM juga unggul dalam kemampuannya menyesuaikan output daya reaktif secara variabel, yang memungkinkan perangkat ini untuk secara efisien menginjeksikan atau menyerap daya reaktif sesuai dengan kebutuhan sistem saat itu. Ini membuat tegangan dapat dipertahankan dalam batas yang diinginkan dengan lebih efisien. Keunggulan lain dari STATCOM adalah kemampuannya meningkatkan stabilitas transien, yaitu kemampuan sistem kelistrikan untuk pulih setelah mengalami gangguan besar, seperti gangguan hubung singkat atau

kerusakan komponen. Ini berkontribusi pada performa sistem yang lebih stabil dan mengurangi risiko pemadaman.

Selain itu, STATCOM memiliki rentang operasi yang lebih luas dibandingkan kapasitor atau perangkat FACTS lainnya, karena mampu beroperasi dalam kondisi overvoltage maupun undervoltage. Fleksibilitas ini sangat penting dalam mengelola kestabilan tegangan, terutama di jaringan yang terhubung dengan sumber energi terbarukan.

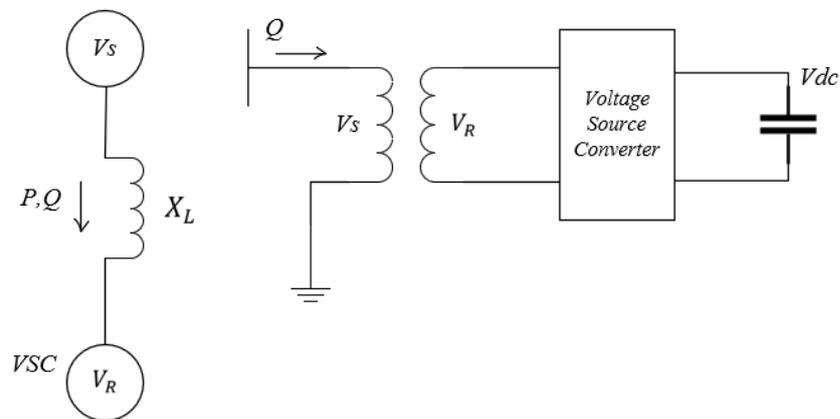
STATCOM terdiri dari sebuah *Voltage Source Converter* (VSC) dan terhubung paralel dengan transformer. STATCOM seperti kondensor sinkron namun dapat menghasilkan dan menyerap daya reaktif lebih cepat karena tidak memerlukan bagian berputar seperti pada kondensor sinkron. STATCOM dapat direpresentasikan seperti Gambar 2 (Taharat, R., 2017).



Gambar 2. STATCOM sistem. (a) VSC terhubung paralel dengan sistem kelistrikan melalui transformer. (b) Rangkaian ekuivalen.

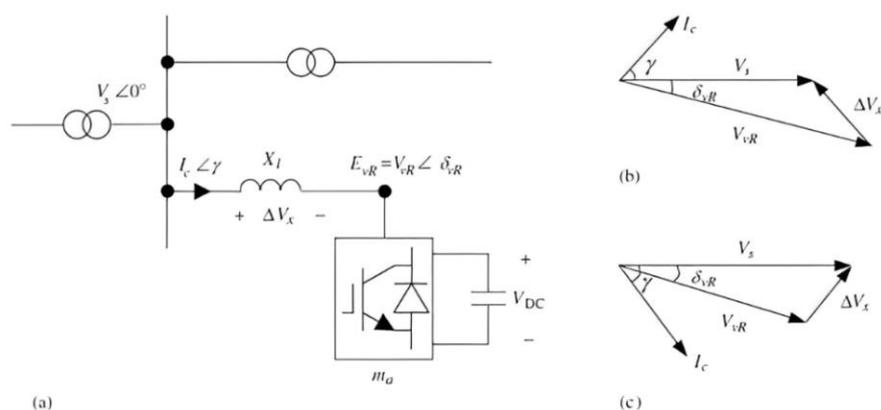
Sumber : (Taharat, R., 2017)

Kendali daya reaktif oleh STATCOM terjadi dengan cara membandingkan besarnya nilai tegangan terminal antara STATCOM dengan sistem. Apabila tegangan STATCOM bernilai lebih rendah maka STATCOM akan menyerap daya reaktif pada sistem. Apabila bernilai lebih tinggi dari sistem maka akan menghasilkan daya reaktif ke sistem. Prinsip kerja dari STATCOM ditunjukkan pada Gambar 3 yang menunjukkan pengiriman daya aktif dan reaktif antara V_s Grid dan V_R STATCOM (Zainuddin, M., & Surusa, F. E. P., 2015).



Gambar 3. Prinsip Kerja pada Sistem STATCOM
Sumber : (Zainuddin, M., 2015)

Interaksi antara VSC dengan sistem tenaga listrik dapat dijelaskan dengan sederhana, dengan menganggap VSC terhubung ke sistem tenaga listrik melalui reaktor (*loss-less reactor*), seperti ditunjukkan pada Gambar 4(a). Tujuannya adalah bahwa amplitudo dan sudut fasa dari drop tegangan (ΔV_x) melalui reaktor (X_L) dapat dikontrol, menentukan besar dan arah dari daya aktif dan daya reaktif yang mengalir melalui (X_L). Tegangan pada bus sistem merupakan sinusoidal dengan nilai $V_s \angle 0^\circ$, dan tegangan AC dari VSC bernilai $V_R \angle \delta_R$. Positif sekuen vektor pada Gambar 4(b) dan 4(c) menunjukkan *leading* dan *lagging* kompensasi daya reaktif (Taharat, R., 2017).



Gambar 4. Operasi dasar dari VSC: (a) VSC dihubungkan dengan bus sistem. Diagram vektor yang merepresentasikan (b) operasi *lagging* (c) operasi *leading*.
Sumber : (Taharat, R., 2017)

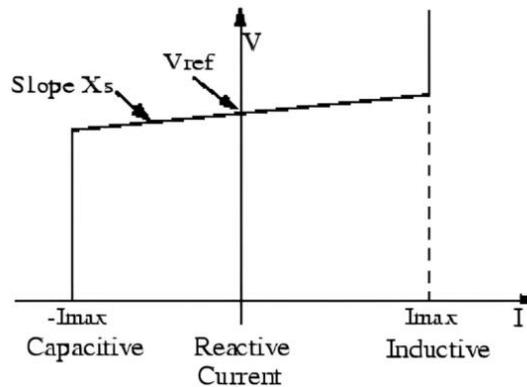
Berdasarkan Gambar 4 maka dapat diamati bahwa (Taharat, R., 2017):

- a. Daya aktif yang mengalir antara bus sistem dan VSC dapat diatur melalui sudut fasa δ_R . Daya aktif mengalir dari bus sistem ke VSC saat *lagging* δ_R ($\delta_R > 0$).
- b. Daya reaktif yang mengalir ditentukan berdasarkan tegangan bus sistem (V_S) dan tegangan output VSC (V_R). Saat $V_R > V_S$, VSC mensuplai daya reaktif dan menyerap daya reaktif saat $V_R < V_S$.

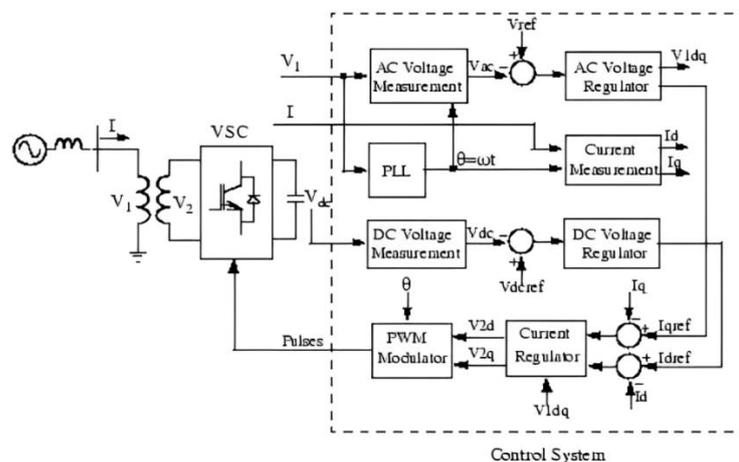
Perbedaan sudut tegangan antara tegangan sistem dan tegangan VSC akan mempengaruhi aliran daya aktif antara sistem dengan STATCOM. Besarnya perbedaan sudut yang membuat *lagging* membuat daya aktif akan mengalir dari STATCOM ke grid. Sebaliknya saat *leading* maka daya aktif akan terserap ke STATCOM. Pada kondisi grid memiliki fasa yang sama dengan STATCOM, maka daya aktif akan bernilai nol ($P = 0$) dimana ini didapatkan saat sistem dalam kondisi *steady state* (Zainuddin, M., & Surusa, F. E. P., 2015).

Dalam keadaan operasi tunak (*steady state*), tegangan V_R yang dihasilkan oleh VSC harus se-fasa dengan tegangan sistem / Grid V_S ($\theta = 0$), sehingga hanya daya reaktif yang dihasilkan ($P = 0$). Jika V_R lebih rendah dari V_S , STATCOM menyerap daya reaktif atau bertindak sebagai beban induktif. Sebaliknya jika V_R lebih tinggi dari V_S , STATCOM menghasilkan daya reaktif atau bertindak sebagai beban kapasitif. (Hazbullah, R., dkk, 2022)

Mode operasi STATCOM berdasarkan tiga kondisi yaitu mode operasi kapasitif, induktif, dan tanpa beban. Rugi-rugi dari STATCOM diabaikan dan arus yang mengalir pada STATCOM (I) dianggap arus reaktif murni. Arus negatif menandakan STATCOM sedang menyalurkan daya reaktif dan beroperasi pada keadaan kapasitif. Sedangkan arus positif menandakan STATCOM menyerap daya reaktif dan beroperasi pada keadaan induktif. Pada keadaan normal, tegangan STATCOM (V) dan tegangan referensi (V_{ref}) besarnya sama dan sefasa. Apabila terjadi perubahan tegangan referensi, maka akan terjadi pertukaran daya reaktif. Kemiringan tegangan (*slope*) biasanya digunakan antara 1% - 5% pada output daya reaktif maksimum dan karakteristik V-I memiliki kemiringan yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik V-I STATCOM
(Sumber : Hazbullah, R, 2022)



Gambar 6. Single Line Diagram dari STATCOM dan Diagram Blok Sistem Kontrolnya
(Sumber : Hazbullah, R, 2022)

Sistem kontrol pada STATCOM digunakan untuk memberikan sinyal pada *Voltage Source Converter (VSC)* yang akan mengatur besarnya daya reaktif yang akan disalurkan atau diserap oleh STATCOM. Sistem kontrol juga akan menjaga tegangan VSC agar sefasa dengan tegangan sistem. Sistem kontrol pada STATCOM ditunjukkan pada Gambar 6 (Hazbullah, R., dkk, 2022).

2.4 Algoritma Genetika

Genetic algorithm (algoritma genetika) pertama kali dicetuskan oleh John Holland lalu disempurnakan oleh David E. Goldberg. Algoritma genetika sebagai cabang dari algoritma evolusi merupakan metode adaptif yang biasa digunakan

untuk memecahkan masalah pencarian nilai dalam permasalahan optimasi. Algoritma genetika berdasarkan proses genetik yang ada pada makhluk hidup, yakni perkembangan generasi dalam suatu populasi yang alami, secara lambat laun mengikuti prinsip seleksi alam. Dengan prinsip individu terkuat yang mampu bertahan.

Algoritma genetika menggunakan analogi secara langsung dari proses seleksi alam. Algoritma genetika diinisialisasi dengan sebuah populasi yang terdiri dari individu-individu, dimana masing-masing individu merepresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi permasalahan yang ada. Dalam hal ini, individu melambangkan sebuah nilai (*fitness*) yang menjadi acuan dalam mencari solusi terbaik dari permasalahan.

Individu pada populasi akan bereproduksi melalui perkawinan silang dengan individu lain. Hasil reproduksi dinamakan anak yang merupakan keturunan, anak tersebut akan membawa sifat dari induknya. Sedangkan individu dengan *fitness* rendah tidak terpilih untuk melakukan reproduksi dan akhirnya mati. Dengan demikian, generasi yang memiliki karakteristik yang baik akan lahir pada populasi. Banyaknya perkawinan antar individu akan menyebabkan kemungkinan generasi terbaik lahir semakin banyak.

Untuk dapat menjalankan algoritma genetika, diperlukan sebuah kode untuk merepresentasikan persoalan yang dihadapi. Kode berupa kromosom yang terdiri atas komponen genetik yang disebut gen. Dalam penerapannya, algoritma genetika memerlukan beberapa operator kerja, yaitu seleksi, perkawinan silang (*cross over*) dan mutasi (*mutation*). Untuk memperoleh hasil optimal, perlu dilakukan proses evaluasi terhadap *fitness* yang direpresentasikan oleh individu terpilih yang menjadi solusi. Hal ini berfungsi untuk mengecek apakah solusi telah sesuai dengan target yang diharapkan.

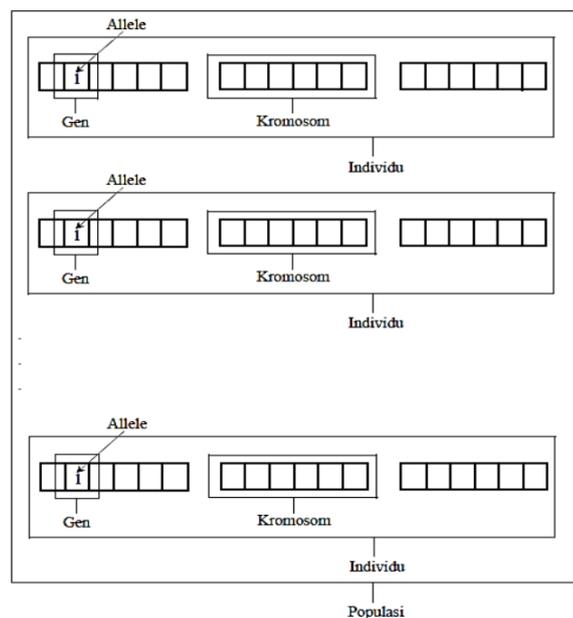
Algoritma genetika menggunakan istilah dari disiplin ilmu biologi. Hal tersebut karena algoritma ini didasari dari teori evolusi dan seleksi alam. Beberapa istilah yang digunakan pada algoritma genetika dalam mendefinisikan individu untuk menyelesaikan permasalahan adalah sebagai berikut:

a. *Genotype* (Gen), nilai yang menyatakan satuan dasar pada individu yang

mendefinisikan arti tertentu. Gen dapat berupa nilai biner, float, integer, karakter maupun kombinatorial.

- b. *Allele*, nilai dari gen.
- c. Kromosom, sekumpulan gen yang membentuk satu kesatuan nilai.
- d. Individu, satu kesatuan kromosom yang menyatakan kemungkinan solusi dari permasalahan.
- e. Populasi, sekumpulan individu yang akan diproses bersama dalam satu siklus proses evolusi.
- f. Generasi, menyatakan satu siklus perulangan atau satu iterasi dalam algoritma genetika.
- g. Nilai *fitness*, nilai yang menyatakan baik tidaknya suatu solusi atau individu.

Gambar 7 merupakan ilustrasi yang menjelaskan istilah-istilah pada algoritma genetika.



Gambar 7. Ilustrasi istilah dalam Algoritma Genetika

Sumber : (Taharat, R., 2017)

Genetic algorithm telah mengalami banyak pengembangan, sehingga banyak sekali variasi pada algoritma ini. Pada dasarnya *genetic algorithm* terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut (Taharat, R., 2017):

- a. Pengkodean

Pengkodean merupakan representasi suatu permasalahan kedalam bahasa

komputasional dalam hal ini disebut gen. Skema yang paling umum digunakan untuk pengkodean adalah *Real-number encoding* $[0, R]$, *Discrete decimal encoding* $[0-9]$, *Binary encoding* $[0,1]$.

b. Evaluasi nilai *fitness*

Suatu individu dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performansinya. Di dalam evolusi alam, individu yang bernilai *fitness* tinggi akan bertahan hidup. Sedangkan individu yang bernilai *fitness* rendah akan mati. Pada masalah optimasi, jika masalah yang dicari adalah memaksimalkan sebuah fungsi h , maka nilai *fitness* yang digunakan adalah nilai dari fungsi h tersebut, yakni $f=h$. Tetapi jika masalahnya adalah meminimalkan fungsi h , maka nilai *fitness* yang digunakan adalah $f=1/h$. Namun jika nilai h dimungkinkan nol, maka nilai *fitness*nya menjadi $f = \frac{1}{h+1}$, dimana a adalah bilangan kecil untuk menghindari nilai f menjadi tak hingga.

c. Seleksi

Pemilihan dua buah kromosom sebagai orang tua, yang akan mengalami *crossover*, biasanya dilakukan secara proporsional sesuai dengan nilai *fitness*nya. Suatu metode yang umum digunakan untuk seleksi adalah *roulette wheel*. Metode ini menirukan permainan roulette wheel dimana masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda *roulette* secara proporsional sesuai dengan nilai *fitness*nya.

d. Perkawinan silang (*cross over*).

Proses *crossover* merupakan operator *genetic algorithm* yang melibatkan dua kromosom (orang tua) untuk membentuk kromosom baru (anak). *Crossover* menghasilkan titik baru dalam ruang pencarian yang siap untuk diuji. Operasi ini dilakukan secara acak dengan probabilitas 0,6 s/d 0,95.

e. Mutasi

Prosedur mutasi sangatlah sederhana. Untuk semua gen yang ada, jika bilangan acak yang dibangkitkan kurang dari probabilitas mutasi yang ditentukan maka ubah gen tersebut menjadi nilai kebalikannya (dalam *binary encoding*, 0 diubah 1, dan 1 diubah 0).

f. Elitisme

Karena seleksi dilakukan secara random, maka tidak ada jaminan bahwa individu dengan nilai *fitness* tertinggi akan selalu terpilih. Walaupun terpilih, mungkin saja individu tersebut menjadi rusak karena proses *crossover*. Untuk menjadi individu dengan nilai *fitness* tinggi agar tidak hilang, maka perlu dibuat satu atau beberapa tiruannya. Prosedur ini disebut dengan *elitisme*.

Proses algoritma genetika mengikuti aturan berikut (Zulfahri & Zondra, E., 2020) :

- a. Tentukan inisial populasi (biasanya string dibangkitkan acak),
- b. Evaluasi seluruh individu (aplikasikan beberapa fungsi atau formula individu),
- c. Menyeleksi populasi baru dari populasi awal berdasar nilai fitness dari individu yang diberikan oleh fungsi evaluasi,
- d. Aplikasikan operator genetika seperti mutase,
- e. dan pindah silang untuk tiap anggota populasi untuk mendapatkan pemecahan baru,
- f. Evaluasi individual baru yang terbentuk,
- g. Ulangi langkah 3-6 (satu generasi) hingga terminasi kriteria memuaskan (biasanya berbentuk nomor generasi tertentu).

2.5 Stabilitas Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kesetimbangan kondisi operasi setelah mengalami gangguan fisik (Kundur, P., at all, 2004). Integritas sistem dipertahankan ketika keseluruhan sistem tenaga listrik tetap utuh tanpa pemutusan generator atau beban, kecuali diputuskan untuk mengisolasi dari elemen-elemen yang mengalami gangguan atau secara sengaja diputuskan untuk mempertahankan kontinuitas operasi sistem.

Sistem tenaga listrik adalah sistem yang beroperasi dengan perubahan beban, keluaran generator, topologi, dan parameter operasi lain yang berubah secara kontinu. Gangguan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yakni

gangguan kecil dan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Sistem harus dapat beroperasi dibawah setiap kondisi secara memuaskan dan sesuai dengan permintaan beban. Selain itu, sistem juga harus dapat bertahan terhadap beberapa gangguan besar dari dalam dan luar sistem, termasuk hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya sebuah pembangkit besar.

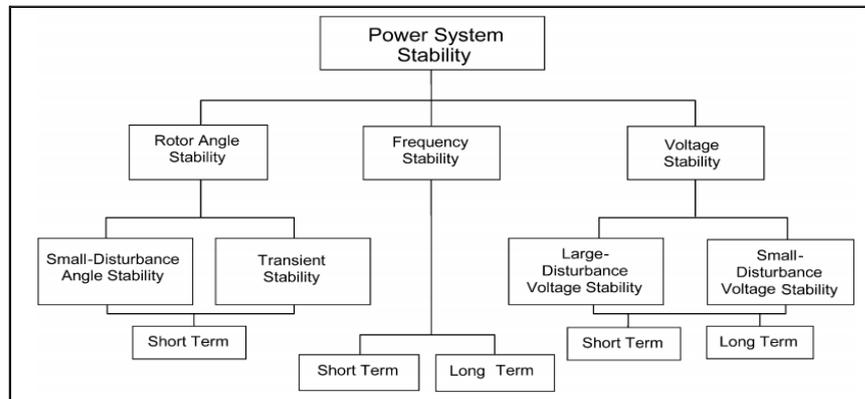
Mengikuti gangguan transien, sistem tenaga listrik yang stabil akan mencapai keadaan setimbang dengan seluruh sistem tetap utuh. Tindakan dari pengendali otomatis dan operator akan segera mengembalikan sistem ke keadaan normal. Sebaliknya, pada sistem yang tidak stabil, hal tersebut akan menyebabkan kondisi lepas kendali, contohnya penurunan secara progresif pada tegangan bus. Sebuah kondisi sistem yang tidak stabil dapat menimbulkan pemadaman dalam porsi yang besar pada sistem tenaga listrik.

Respons sistem tenaga listrik terhadap gangguan dapat mempengaruhi kondisi peralatan. Sebagai contoh, sebuah gangguan pada elemen yang kritis dapat mempengaruhi aliran daya, tegangan bus jaringan, dan kecepatan rotor mesin. Fluktuasi tegangan akan mengaktifkan *exciter* pada generator, fluktuasi beban akan mengaktifkan *governor* untuk menyesuaikan kecepatan generator, serta fluktuasi tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban sistem yang bergantung pada karakteristik masing-masing. Alat yang digunakan untuk melindungi peralatan tertentu dapat memberikan respon pada variasi variabel sistem dan mempengaruhi unjuk kerja sistem tenaga listrik. Sehingga, ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik mungkin terjadi dalam bentuk yang berbeda bergantung pada topologi sistem, mode operasi, dan bentuk gangguan (Winanty, C, W., 2011).

Stabilitas sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini (Kundur, P., 1994) :

- a. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.

- c. Divais, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.



Gambar 8. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik
Sumber : (Kundur, P. dkk, 2004)

Gambar 8 menunjukkan klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, dan stabilitas tegangan. Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan tunak pada seluruh bus dalam sistem yang berada di bawah kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik.

Faktor utama penyebab ketidakstabilan tegangan biasanya adalah jatuh tegangan. Hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengirim daya. Transfer daya akan semakin terbatas ketika beberapa generator mencapai batas kemampuan daya reaktifnya. Pemicu utama ketidakstabilan tegangan adalah beban. Dalam merespon sebuah gangguan, daya yang dikonsumsi beban dipulihkan oleh aksi dari regulator tegangan distribusi dan transformator *on load tap-changing*. Pemulihan beban meningkatkan tekanan pada jaringan tegangan tinggi menyebabkan lebih banyak pengurangan tegangan. Situasi tersebut menyebabkan terjadi ketidakstabilan tegangan ketika beban dinamis berusaha memulihkan konsumsi daya di luar kemampuan sistem transmisi dan pembangkit yang terhubung.

Stabilitas tegangan dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

- a. Stabilitas tegangan gangguan besar dikaitkan dengan kemampuan suatu sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan besar, seperti gangguan sistem, lepasnya pembangkitan, atau *circuit contingencies*. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik antara beban dan sistem, serta interaksi dari sistem proteksi dan kendali kontinu. Penentuan stabilitas gangguan besar membutuhkan pengujian unjuk kerja dinamis nonlinear suatu sistem selama periode waktu tertentu sehingga dapat menangkap interaksi beberapa divais seperti *on-load transformer tap changer* (OLTC) dan pembatas arus medan pada generator. Rentang waktu studinya dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, simulasi dinamis jangka panjang dibutuhkan untuk analisa.
- b. Stabilitas tegangan gangguan kecil terkait berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan kecil seperti kenaikan beban sistem. Bentuk stabilitas ini ditentukan antara lain oleh karakteristik beban dan kendali kontinyu. Konsep ini berguna untuk menentukan bagaimana tegangan sistem akan merespon terhadap perubahan kecil pada sistem setiap saat. Proses dasar yang berkontribusi terhadap stabilitas tegangan gangguan kecil adalah keadaan stabil alam. Oleh sebab itu, analisis statis dapat digunakan secara efektif untuk menentukan batas stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan menguji kondisi sistem dalam cakupan luas, serta sejumlah besar skenario pasca gangguan. Kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan kecil adalah sebagai berikut, pada kondisi operasi untuk setiap bus dalam sistem, nilai tegangan bus meningkat saat injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Sebuah sistem dikatakan tidak stabil tegangannya jika untuk minimal satu bus pada sistem, nilai tegangan bus menurun ketika injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Dengan kata lain, sebuah sistem dikatakan stabil tegangannya jika sensitivitas $V-Q$ adalah positif untuk seluruh bus, sedangkan dikatakan tidak stabil jika sensitivitas $V-Q$ adalah negatif untuk minimal satu bus.

Masalah stabilitas tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya runtuh tegangan. Gangguan yang menyebabkan runtuh tegangan dapat dipicu oleh beberapa hal, seperti naiknya beban atau gangguan besar yang muncul secara tiba-tiba. Masalah yang paling mendasar adalah lemahnya sistem tenaga listrik. Di samping kekuatan jaringan transmisi dan kemampuan transfer daya, faktor-faktor yang berkontribusi dalam fenomena runtuh tegangan (*voltage collapse*), antara lain batas kendali tegangan / daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik kompensator daya reaktif, dan aksi dari divais kendali tegangan seperti transformator *on-load tap changer*.

Istilah-istilah yang terkait dengan stabilitas tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut (Kundur, P., at all, 2004) :

- a. Stabilitas tegangan (*voltage stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*voltage collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah pada bagian penting dari sistem tenaga listrik.
- c. Keamanan tegangan (*voltage security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik, tidak hanya untuk beroperasi stabil, tetapi juga tetap stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) setelah terjadi gangguan atau perubahan keadaan sistem yang signifikan.

2.6 MATLAB (*Matrix Laboratory*)

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah suatu program untuk analisis dan komputasi *numeric* dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya, program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin-rutin *numeric* dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan menggunakan

bahasa FORTRAN namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan *assembler* (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB). MATLAB merupakan merk *software* yang dikembangkan oleh Mathworks, Inc. merupakan *software* yang paling efisien untuk perhitungan *numeric* berbasis matriks. Dengan demikian jika di dalam perhitungan kita dapat memformulasikan masalah ke dalam format matriks maka MATLAB yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi *numeric*, untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Sehingga MATLAB banyak digunakan pada : (1) Matematika dan Komputansi, (2) Pengembangan dan Algoritma, (3) Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan *prototype*, (4) Analisa data, eksplorasi dan visualisasi, (5) Analisis *numeric* dan *statistic*, dan (6) Pengembangan aplikasi teknik. (Hasmudi, N, H, 2020).