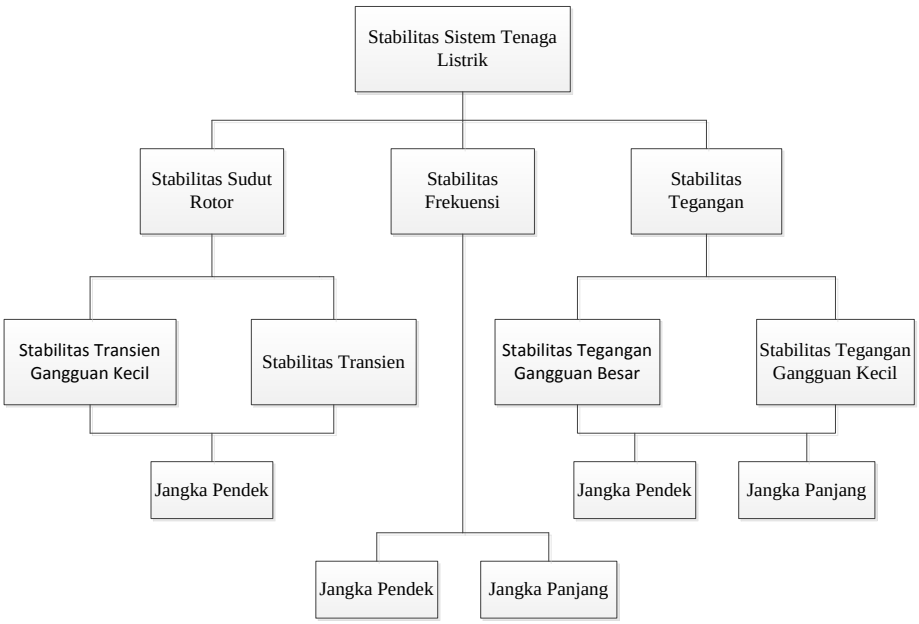
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stabilitas Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Sedangkan ketidakstabilan sistem dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung dari konfigurasi sistem dan model operasinya. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh jatuh tegangan yang tidak terkontrol [2]. Ini berarti bahwa ketika terjadi kegagalan tidak akan menyebabkan permasalahan instabilitas. Karena kerumitan sistem tenaga listrik, instabilitas yang berbeda saling mempengaruhi satu dengan yang lain. Pemadaman total sering dimulai dengan sebuah permasalahan stabilitas tunggal tetapi setelah fasa awal tersebut, instabilitas lain akan terjadi. Oleh karena itu, tindakan untuk mencegah pemadaman total tersebut pada berbagai kondisi mungkin berbeda. Gambar 2.1 memberikan gambaran keseluruhan dari permasalahan stabilitas energi listrik.



Gambar 2.1. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik [2]

2.2. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan *steady state* pada setiap bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dari sebuah kondisi awal operasi. Kondisi sistem berada pada wilayah instabilitas ketika terjadi gangguan atau peningkatan kebutuhan beban. Stabilitas tegangan tergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan atau mengembalikan kesetimbangan diantara permintaan dan pasokan beban dari sistem tenaga listrik [3].

Sebuah sistem dikatakan berada pada kondisi tegangan stabil jika pada kondisi operasi yang diberikan, untuk semua bus berada di dalam sistem, magnitudo tegangan bus meningkat selama penginjeksian daya reaktif pada bus yang sama ditingkatkan. Instabilitas tegangan di dalam sistem tenaga listrik terjadi karena ketidakmampuan

sistem tenaga listrik untuk menyalurkan beban pada saat terjadinya gangguan. Gangguan dapat bersifat besar dan kecil di alam. Semua peralatan dalam sistem tenaga listrik sebenarnya dirancang sedemikian rupa sehingga peralatan tersebut dapat dengan sendirinya terputus dengan jaringan listrik. Alasan dari pemutusan ini secara umum dibagi menjadi dua kategori [4]:

a. Gangguan Terencana (*Scheduled outages*)

   Biasanya untuk melakukan perawatan dan penggantian peralatan dan seperti namanya, waktu pemutusan dijadwalkan oleh operator untuk mengurangi pengaruhnya kepada keandalan sistem.

b. Gangguan Paksa (*Forced outages*)

   Terjadi secara acak dan mungkin disebabkan oleh kegagalan internal komponen atau pengaruh dari luar seperti sambaran petir dan badai.

Stabilitas tegangan dapat diklasifikasikan kedalam beberapa subkategori sebagai berikut [3]:

2.2.1. Stabilitas Tegangan Gangguan Besar

Stabilitas tegangan gangguan besar berkaitan dengan kemampuan sebuah sistem untuk mengontrol tegangan setelah terjadi gangguan besar seperti kegagalan sistem, kehilangan beban, atau kehilangan pembangkit. Penentuan bentuk stabilitas ini membutuhkan pemeriksaan performansi dinamik sistem dalam sebuah periode waktu yang cukup untuk dapat menangkap interaksi dari beberapa devais seperti *under-load transformer tap changers* (ULTS) dan *generator field-current limiters*. Stabilitas

tegangan gangguan besar bersifat mendadak, yakni gangguan yang menghasilkan kejutan tegangan tiba-tiba pada tegangan bus. Gangguan besar ini harus secepatnya dihilangkan, jika tidak dihilangkan, maka gangguan tersebut dapat mempengaruhi kestabilan sistem.

2.2.2. Stabilitas Tegangan Gangguan Kecil

Stabilitas tegangan (sinyal kecil) gangguan kecil berkaitan dengan kemampuan sebuah sistem untuk mengontrol tegangan setelah terjadi gangguan kecil, berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan dan bertingkat. Jatuh (trip) yang dialami oleh jaringan tenaga listrik dianggap sebagai gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada aliran itu tidak signifikan. Stabilitas tegangan (sinyal kecil) gangguan kecil merupakan satu dari elemen sistem dinamik yang dapat dianalisis menggunakan persamaan linear (analisis sinyal kecil).

2.3. *Flexible AC Transmission System* (FACTS)

Pada saat ini, jumlah pembangkit listrik meningkat dengan pesat untuk dapat menyesuaikan dengan peningkatan jumlah kebutuhan akan energi listrik. Pada proses ini, saluran transmisi yang sudah ada dapat mengalami kelebihan beban dan mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Maka diperlukan suatu peralatan untuk sistem tenaga listrik yang lebih efisien dan memiliki respon yang cepat. Saluran transmisi baru atau pemakaian devais FACTS pada sistem transmisi listrik dapat meningkatkan stabilitas dan kemampuan pembebanan saluran. Devais FACTS

mengacu pada sistem tenaga listrik moderen berdasarkan keseluruhan kemampuannya. Devais FACTS adalah kunci untuk menghasilkan energi listrik yang bersahabat secara ekonomi dan terhadap lingkungan di masa mendatang.

FACTS adalah sebuah pengontrol berbasis elektronika daya dan peralatan statis lain yang menyediakan kontrol satu atau lebih parameter saluran transmisi, meningkatkan *controllability* dan peningkatan kapabilitas penyaluran energi listrik.

Pengontrol FACTS digunakan untuk kontrol tegangan dinamik, impedansi dan sudut fasa dari saluran transmisi tegangan tinggi. Secara umum pengontrol FACTS dapat dibagi menjadi empat kategori [5]:

a. Pengontrol seri

Pengontrol seri merupakan impedansi variabel, seperti kapasitor, reactor, Atau elektronika daya yang berbasis sumber variabel dari frekuensi utama dan frekuensi harmonik untuk menyediakan kebutuhan yang diinginkan. Pengontrol seri menginjeksikan tegangan secara seri kepada saluran. Sepanjang tegangan sefasa kuadratur dengan arus saluran, pengontrol seri hanya menyerap variabel daya reaktif. Pengontrol seri seperti *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC), *Controlled Phase Angle Regulators* (TCPAR) dan *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) sekarang telah secara luas digunakan.

b. Pengontrol Shunt

Pengontrol Shunt terdiri dari impedansi variabel, sumber variabel, atau kombinasi dari keduanya. Prinsipnya, seluruh pengontrol shunt

menginjeksikan arus kedalam sistem pada titik dimana pengontrol shunt tersebut dihubungkan. Sepanjang arus yang diinjeksi sefasa kuadratur dengan tegangan, pengontrol shunt menyalurkan variabel daya reaktif. Pengontrol shunt seperti *Static Var Compensator* (SVC) dan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) adalah contoh dari jenis ini.

c. Pengontrol kombinasi seri-seri

Pengontrol kombinasi seri-seri merupakan kombinasi kontroler seri terpisah, yang dikontrol secara terkordinasi, dalam multi saluran sistem transmisi atau sebagai sebuah pengontrol terpadu dimana pengontrol seri menyediakan kompensasi daya reaktif seri bagi masing-masing saluran tetapi juga mengirim daya nyata diantara saluran melalui saluran DC. Kemampuan transfer daya nyata dari pengontrol seri-seri terpadu, mengacu pada *Interline Power Flow Controller* (IPFC), memungkinkan untuk menyeimbangkan aliran daya nyata dan reaktif dalam saluran dan memaksimalkan pengunaan sistem jaringan transmisi.

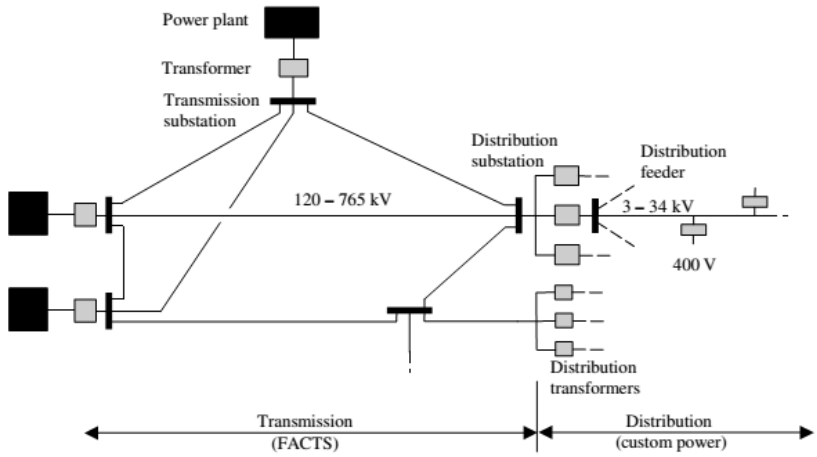
d. Pengontrol kombinasi seri-shunt

Pengontrol kombinasi seri-shunt merupakan kombinasi antara pengontrol shunt dan seri terpisah, yang di kontrol secara terkordinasi atau sebuah *Unified Power Flow Controller* (UPFC) dengan elemen seri dan shunt. Prinsipnya, pada bagian pengontrol shunt menginjeksikan arus kedalam sistem dan pada bagian pengontrol seri menginjeksikan tegangan secara seri kedalam saluran. Namun ketika pengontrol seri dan shunt digabungkan, maka

akan terdapat pertukaran daya nyata diantara pengontrol seri dan shunt melalui saluran DC yang menghubungkan keduanya.

Masing-masing kategori mempunyai jenis devais FACTS berbeda dan digunakan pada kondisi tertentu. Pemilihan devais yang tepat penting karena pemilihan tersebut bergantung pada tujuan yang ingin dicapai.

Sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi dua level penyaluran yaitu level transmisi dan level distribusi. Pada level distribusi, biasanya devais daya sebagian besar meningkatkan kualitas tegangan. Devais FACTS mampu mengurangi tegangan kedip (*flicker*), mitigasi tegangan dips dan saat terjadi gangguan devais ini mempunyai sumber lain yang dapat menyuplai jaringan distribusi di samping suplai dari jaringan utama. Sedangkan, pada level transmisi saat ini baru diketahui bahwa dengan penggunaan transmisi DC lebih efisien daripada transmisi AC. Namun, terdapat lebih banyak jaringan transmisi AC daripada jaringan transmisi DC. Karena saluran transmisi DC lebih mahal karena harus menggubah arus AC tersebut terlebih dahulu ke arus DC. Oleh sebab itu, FACTS dikembangkan untuk dapat memaksimalkan transmisi energi listrik AC. Gambar 2.2 memperlihatkan wilayah pemasangan FACTS pada level transmisi.



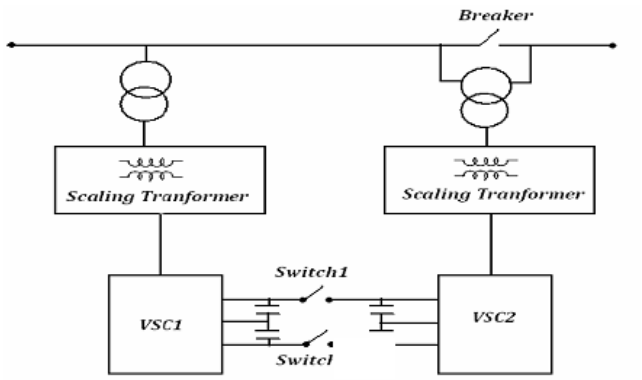
Gambar 2.2. Wilayah Pemasangan FACTS [6]

FACTS digunakan di dalam saluran transmisi dengan tujuan utama untuk mengoperasikan saluran transmisi sampai batas termalnya. Tanpa FACTS, saluran masih tetap menyalurkan banyak energi listrik tetapi dengan persentasi daya reaktif yang besar. Daya reaktif adalah permasalahan utama yang tidak memungkinkan aliran daya aktif meningkat. Semakin besar daya reaktif di dalam saluran lebih sedikit daya aktif dapat mengalir melalui saluran karena jumlah daya reaktif yang besar juga mengalir mengurangi efisiensi saluran karena meningkatnya temperatur dan hanya sedikit porsi daya aktif yang dapat disalurkan.

Sebagai tambahan, FACTS juga dapat meningkatkan stabilitas sistem, mengontrol tegangan dan redaman (*damping*) osilasi daya. Ini adalah alasan mengapa sangat penting untuk mempelajari stabilitas sistem energi listrik dengan mempertimbangkan pemakaian FACTS.

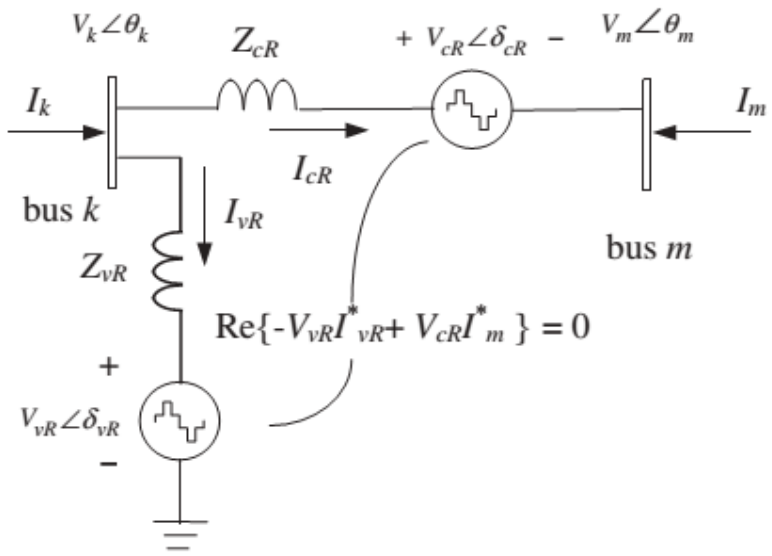
2.4. *Unified Power Flow Controller* (UPFC)

UPFC adalah salah satu pengontrol FACTS yang menjanjikan untuk meregulasi tegangan dan aliran daya dalam jaringan transmisi. Model *steady state* UPFC mengandung dua sumber tegangan ekuivalen, masing-masing mempunyai magnitudo dan sudut fasa yang dapat dikontrol terhubung seri melalui impedansi transformer. Sumber tegangan ini mewakili cabang (*branch*) shunt dan seri UPFC. Model aliran daya UPFC memiliki dua buah *Voltage Source Converter* (VSC), satu terhubung shunt dan yang lainnya terhubung seri. Konverter masing-masing mempunyai kapasitor DC, yang terhubung secara pararel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Ketika switch 1 dan 2 terbuka, konverter adalah STATCOM dan SSSC, yang mengatur arus injeksi daya reaktif dan tegangan di kedua cabang shunt dan seri saluran transmisi. Pada saat switch 1 dan 2 ditutup, memungkinkan kedua konverter menyalurkan daya nyata diantara kedua konverter. Konverter terhubung seri dapat menyerap atau menghasilkan daya aktif [7].



Gambar 2.3. Skematik UPFC [7]

Seperti yang dijelaskan sebelumnya untuk tujuan analisis frekuensi dasar *steady-state* rangkaian ekuivalen UPFC terdiri dari dua kordinat VSC. Seperti sebuah rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada gambar 2.4. VSC mewakili komponen dasar deret Fourier dari *switched voltage waveforms* (bentuk gelombang tegangan beralih) pada terminal konverter AC.



Gambar 2.4. Rangkaian Ekuivalen UPFC [6]

Sumber tegangan UPFC adalah:

$$E_{vR} = V_{vR}\,(\cos\delta_{vR} + \mathrm{j}\sin\delta_{vR}), \tag{2.1}$$

$$E_{cR} = V_{cR}\,(\cos\delta_{cR} + \mathrm{j}\sin\delta_{cR}), \tag{2.2}$$

Dimana E_{vR} dan δ_{vR} adalah magnitudo yang dapat diatur ($V_{vR\,min} \leq V_{vR} \leq V_{vR\,max}$) dan sudut fasa ($0 \leq \delta_{vR} \leq 2\pi$) dari sumber tegangan pada konverter shunt. Magnitudo V_{cR} dan sudut fasa δ_{cR} sumber tegangan pada konverter seri dikontrol dengan batas ($V_{cR\,min} \leq V_{cR} \leq V_{cR\,max}$) dan ($0 \leq \delta_{cR} \leq 2\pi$) secara berurutan.

Sudut fasa dari tegangan injeksi seri menentukan modus kontrol aliran daya. Jika δ_{cR} sefasa dengan sudut tegangan nodal θ_k, UPFC meregulasi tegangan terminal. Jika δ_{cR} sekwadratur dengan θ_k, UPFC mengontrol aliran daya aktif, bertingkah seperti *phasa shifter*. Jika δ_{cR} sekwadratur dengan sudut arus saluran maka UPFC mengontrol aliran daya aktif, bertingkah seperti regulator tegangan, kompensator variabel seri, dan *phase shifter*. Magnitudo dari injeksi tegangan seri menentukan jumlah aliran daya yang akan dikontrol.

Berdasarkan pada rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan Persamaan (2.1) dan (2.2), persamaan daya aktif dan reaktif adalah,

Pada bus *k*

$$P_k = V_k^2 G_{kk} - V_k V_m [G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)]$$
$$+ V_k V_{cR} [G_{km}\cos(\theta_k - \delta_{cR}) + B_{km}\sin(\theta_k - \delta_{cR})]$$
$$+ V_k V_{vR} [G_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (2.3)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)]$$
$$+ V_k V_{cR} [G_{km}\cos(\theta_k - \delta_{cR}) - B_{km}\sin(\theta_k - \delta_{cR})]$$
$$+ V_k V_{vR} [G_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR})]\,; \quad (2.4)$$

Pada bus *m*

$$P_k = V_m^2 G_{mm} - V_m V_k [G_{mk}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k)]$$
$$+ V_m V_{cR} [G_{mm}\cos(\theta_m - \delta_{cR}) + B_{mm}\sin(\theta_m - \delta_{cR})], \quad (2.5)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k)]$$
$$+ V_m V_{cR} [G_{mm}\cos(\theta_m - \delta_{cR}) - B_{mm}\sin(\theta_m - \delta_{cR})]; \quad (2.6)$$

Konverter Seri

$$P_{cR} = V_{cR}^2 G_{mm} - V_{cR} V_k [G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) + B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k)]$$
$$+ V_k V_{cR} [G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) + B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_m)], \quad (2.7)$$

$$Q_{cR} = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m [G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) - B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_m)]$$
$$+ V_{cR} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) - B_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m)], \quad (2.8)$$

Konverter Shunt

$$P_{vR} = -V_k^2 G_{kk} - V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)],$$
$$Q_{vR} = V_{vR}^2 B_{vR} - V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)]. \quad (2.9)$$

Dengan mengasumsikan tidak ada rugi-rugi pada konverter, daya aktif yang disalurkan ke konverter, P_{vR}, sama dengan daya aktif yang diperlukan oleh konverter seri, P_{cR}; maka,

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (2.10)$$

Selanjutnya, jika transformer kopling diasumsikan tidak memeliki resistansi maka daya aktif pada bus k sama seperti daya aktif pada bus m. maka,

$$P_{vR} + P_{cR} = P_k + P_m = 0 \quad (2.11)$$

Persamaan daya UPFC, dalam bentuk linier, dikombinasikan dengan jaringan listrik. Pada saat permasalahan ketika kontrol UPFC : (1) tegangan magnitudo pada terminal konverter shunt (bus k), (2) aliran daya aktif dari bus m ke bus k, dan (3) injeksi daya reaktif pada bus m, dan mengambil bus m menjadi bus *PQ*. Persamaan dari sistem linier adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \frac{\Delta V_{cR}}{V_{cR}} \\ \Delta \delta_{vR} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dimana ΔP_{bb} adalah selisih daya (*power mismatch*) diberikan pada persamaan (2.10) Jika kontrol tegangan pada bus *k* dimatikan, kolum ketiga dari persamaan (2.11) diganti oleh turunan parsial dari bus dan selisih daya UPFC berkaitan dengan tegangan magnitudo V_k. Selain itu, kenaikan tegangan magnitudo dari sumber shunt, $\Delta V_{vR}/V_{vR}$ diganti oleh kenaikan tegangan magnitudo pada bus *k*, $\Delta V_k/V_k$.

Jika kedua bus, *k* dan *m*, adalah bus PQ persamaan sistem linier adalah sebagai berikut:

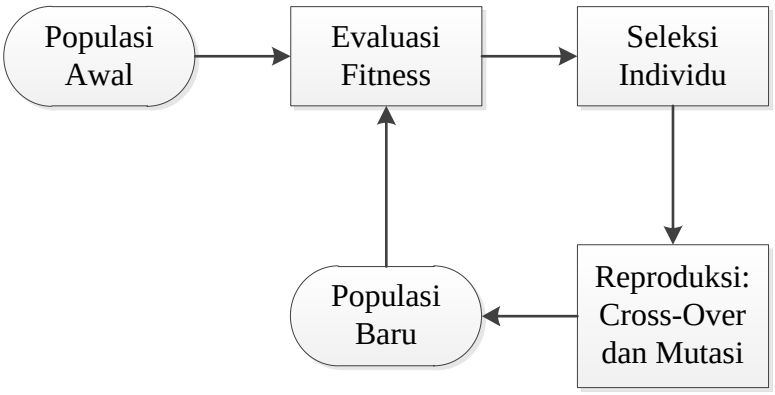
$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \frac{\Delta V_{cR}}{V_{cR}} \\ \Delta \delta_{vR} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Pada kasus ini, V_{vR} dipertahankan pada sebuah nilai tetap dalam batas-batas tertentu, $V_{vR\,min} \leq V_{vR} \leq V_{vR\,max}$. bentuk jakobian dalam persamaan (2.12) dan (2.13) diberikan pada lampiran C, subbab C5.

2.5. Algoritma Genetika (AG)

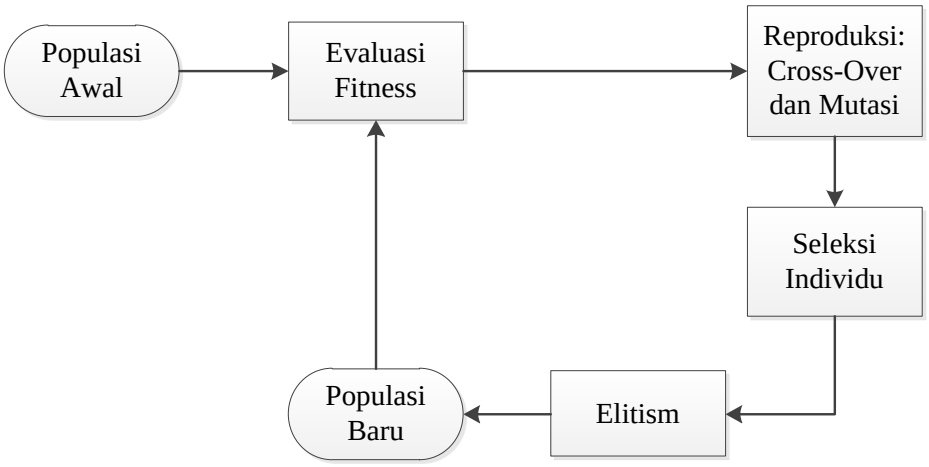
Sejak pertama kali dirintis oleh John Holland, AG telah dipelajari, diteliti dan diaplikasikan secara luas pada berbagai bidang. AG banyak digunakan pada masalah praktis yang berfokus pada pencarian parameter-parameter yang optimal. Namun demikian, AG juga dapat digunakan untuk memecahkan masalah-masalah selain optimasi. Selama suatu masalah berbentuk adaptasi (alami maupun buatan), maka dapat diformulasikan dalam terminologi genetika [8].

AG merupakan teknik *search stochastic* yang berdasarkan mekanisme seleksi alam dan genetika natural. Teknik pencarian dilakukan sekaligus atas sejumlah solusi yang mungkin dikenal dengan istilah populasi. Setiap individu di dalam populasi disebut kromosom, yang merepresentasikan suatu penyelesaian terhadap masalah yang ditangani. Sebuah kromosom terdiri dari sebuah *string* yang berisi berbagai simbol, dan biasanya, tetapi tidak mutlak, *string* tersebut berupa sederetan bit-bit biner "0" dan "1". Sebuah kromosom tumbuh atau berkembang biak melalui berbagai iterasi yang berulang-ulang, dan disebut sebagai generasi. Pada setiap generasi, berbagai kromosom yang dihasilkan akan dievaluasi menggunakan suatu pengukuran fitness. Nilai fitness dari suatu kromosom akan menunjukkan kualitas dari kromosom dalam populasi tersebut. Generasi berikutnya dikenal dengan istilah anak (*offspring*) terbentuk dari gabungan dua kromosom generasi sekarang yang bertindak sebagai induk (*parent*) dengan menggunakan operator penyilangan (*crossover*). Siklus dari algoritma genetika pertama kali diperkenalkan oleh David Goldberg, dimana gambaran siklus tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Siklus Algoritma Genetika oleh David Goldberg

Siklus ini kemudian diperbaiki oleh beberapa ilmuwan yang mengembangkan algoritma genetika, yaitu Zbigniew Michalewicz dengan menambahkan operator elitism dan membalik proses seleksi setelah proses reproduksi. Gambar 2.6 merupakan siklus algoritma genetika yang diperbarui oleh Zbigniew Michalewicz.



Gambar 2.6. Siklus Algoritma genetika yang diperbarui oleh Michalewicz

Dalam siklus perkembangan AG mencari solusi (kromosom) ‘terbaik’ terdapat beberapa proses sebagai berikut:

2.5.1 Inisialisasi

Inisialisasi dilakukan untuk membangkitkan himpunan solusi baru secara acak/random yang terdiri atas sejumlah *string* kromosom dan ditempatkan pada penampungan yang disebut populasi. Dalam tahap ini harus ditentukan ukuran populasi. Nilai ini menyatakan banyaknya kromosom yang ditampung dalam populasi. Panjang setiap string kromosom dihitung berdasarkan presisi variabel solusi yang dicari.

2.5.2 Evaluasi

Evaluasi digunakan untuk menghitung kebugaran (*fitness*) setiap kromosom. Semakin besar *fitness* maka semakin baik kromosom tersebut untuk dijadikan calon solusi. Karena sebuah kromosom selalu memiliki nilai *fitness* dan beberapa properti lain, maka dalam pembahasan berikutnya seringkali digunakan istilah 'individu'. Hal ini bisa dianalogikan dengan seorang manusia sebagai individu. Dia memiliki tubuh beserta susunan gen pembentuknya (kromosom), nama, umur, alamat dan properti lainnya.

2.5.3 Seleksi

Dalam AG, Seleksi merupakan proses pemilihan individu terbaik untuk menjadi calon orang tua yang akan dilakukan proses selanjutnya. Proses pemilihan tersebut biasanya dipilih berdasarkan probabilitas dari individu yang terbaik dalam populasi. Individu yang terbaik ditentukan berdasarkan nilai fitness masing-masing dari tiap-tiap individu. Selama beberapa tahun yang lalu, banyak metode seleksi yang telah digunakan, diuji, dan dibandingkan. Jenis metode antara lain [9]:

a. *Roullete wheel*
b. $(\mu + \lambda)$
c. *Tournament*
d. *Steady-state*
e. *Ranking and scaling*
f. *Sharing*

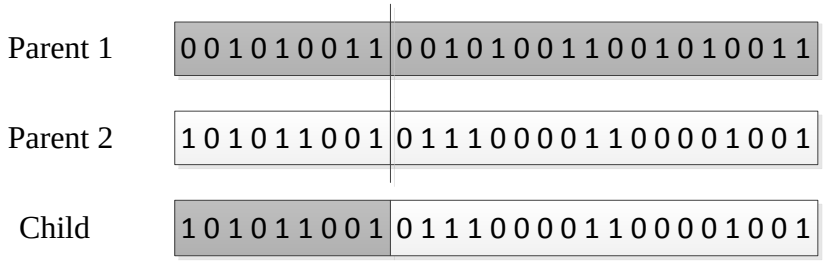
2.5.4 Reproduksi

Reproduksi dilakukan untuk menghasilkan keturunan dari individu-individu yang ada di populasi. Himpunan keturunan ini ditempatkan dalam penampungan anak (*offspring*). Dua operator genetika yang digunakan dalam proses ini antara lain:

a. Pindah Silang (Cross-Over)

Proses ini dilakukan dengan cara mengambil masing-masing bagian string bit dari induk dan induk lainnya dan mengkombinasikan kedua bagian tersebut untuk menghasilkan anak. Ada tiga jenis pindah silang: pindah silang satu titik, pindah silang dua titik dan pindah silang seragam.

Pindah silang satu titik seperti yang diilustrasikan dalam gambar 2.7. String bit kedua induk (*parent*) dipotong pada pada titik yang sama. Jadi, anak dapat dihasilkan dengan mengambil masing-masing bagian dari induk. Perhatikan bahwa bagian yang tidak berpindah. Pemilihan titik potong dipilih secara independen dan acak. Satu parameter string bit mungkin dikodekan lebih dari satu bit, dan pengkodean dipotong menjadi dua bagian selama proses pindah silang, maka menghasilkan nilai baru yang berbeda dari induk.



Gambar 2.7. Pindah Silang Satu titik [10]

Pindah silang dua titik (gambar 2.8) berbeda dengan versi sebelumnya dalam pindah silang dua titik dipotong dan menghasilkan tiga bagian mengabungkanya agar menghasilkan anak.

Parent 1	0 0 1 0 1 0 0 1 1	0 0 1 0 1 0 0 1 1	0 0 1 0 1 0 0 1 1
Parent 2	1 0 1 0 1 1 0 0 1	0 1 1 1 0 0 0 0 1	1 0 0 0 0 1 0 0 1
Child	1 0 1 0 1 1 0 0 1	0 1 1 1 0 0 0 0 1	1 0 0 0 0 1 0 0 1

Gambar 2.8. Pindah Silang Dua titik [10]

Pindah silang seragam diperlihatkan seperti gambar 2.9. Disini, untuk masing-masing bit, dipilih secara acak bit ditiru dari induk satu atau dua.

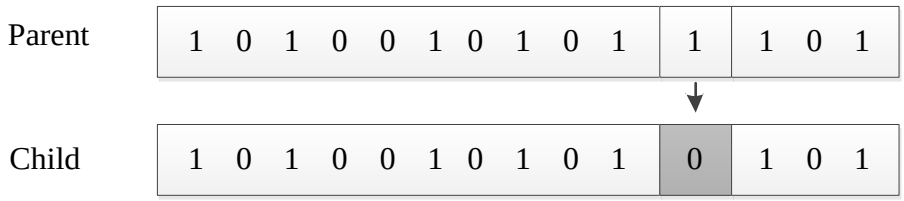
Parent 1	0	0 0	0	0 0	0	0 0 0	0 0	0
Parent 2	1	1 1	1	1 1	1	1 1 1	1 1	1
Child	0	1 1	0	1 1	0	1 1 1	0 0	1

Gambar 2.9. Pindah Silang Seragam [10]

b. Mutasi

Mutasi merupakan proses untuk mengubah nilai dari satu atau beberapa gen dalam suatu kromosom. Operasi crossover yang dilakukan pada kromosom dengan tujuan untuk memperoleh kromosom-kromosom baru sebagai kandidat solusi pada generasi mendatang dengan fitness yang lebih baik, dan lama-kelamaan menuju solusi optimum yang diinginkan. Akan tetapi, untuk mencapai hal ini, penekanan selektif juga memegang peranan yang penting.

Jika dalam proses pemilihan kromosom-kromosom cenderung terus pada kromosom yang memiliki fitness yang tinggi saja, konvergensi prematur akan sangat mudah terjadi [8]. Gambar 2.10 memperlihatkan siklus mutasi di dalam AG.



Gambar 2.10. Mutasi Dalam Algoritma Genetika [10]

2.6. Kajian Pustaka

Manu K dan Kusumadevi G.H. (2014) menawarkan pendekatan penempatan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) dan *Static Var Compensator* (SVC) dengan menghitung cabang mana yang paling peka terhadap kontigensi tunggal. Setelah menempatkan devais FACTS tersebut, pengaturan optimal devais FACTS, biaya pemasangan diperoleh dengan menggunakan permasalahan optimisasi. permasalahan optimisasi nonliniear diselesaikan dengan menggunakan metode Algoritma Genetika (AG).

Satheesh A (2013) menawarkan penggunakan metode teknik *hybrid* untuk meningkatkan stabilitas tegangan dan mengurangi rugi-rugi. Artificial Neural Network (ANN) digunakan untuk mengidentifikasi lokasi optimal UPFC. Algoritma Genetika (AG), *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Bees algorithm* (BA)

digunakan untuk menghitung jumlah dari tegangan dan sudut yang akan diinjeksikan. Jumlah rugi-rugi daya pada saat beroperasi normal, setelah terjadi kenaikan beban dan setelah pemasangan UPFC dibandingkan.

R. Medeswaran dan N. Kamaraj (2014) menawarkan penggunaan metode algoritma pencarian stokastik seperti Algoritma Genetika (AG) dan *Particle Swarm Optimazation* (PSO). Nilai *Contingency Severity Index* (CSI) dihitung untuk setiap saluranya. *Contingency Severity Index* (CSI) digunakan untuk merangking saluran yang paling terpengaruh selama terjadi kontingensi tunggal. Setelah daftar rangking diperoleh, metode algoritma pencarian stokastik digunakan untuk mencari lokasi dan pengaturan terbaik FACTS. Tujuan menggunakan metode ini adalah untuk mengeleminasi dan mengurangi kelebihan muatan pada saluran. Komponen FACTS yang digunakan adalah *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) dan *Unified Power Flow Controller* (UPFC). Saluran yang ditinjau pada penelitian ini adalah IEEE 6-bus, IEEE 30-bus dan IEEE 118-bus sistem uji.