BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya bertujuan untuk memperoleh besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, daya nyata serta daya reaktif yang mengalir pada setiap saluran beban. Besaran tersebut digunakan mengevalusasi kinerja suatu sistem tenaga listrik dan juga menganalisis kondisi pembangkitan, saluran transmisi, dan beban dalam kondisi normal maupun dalam ganguan. Pada penyelesaian permasalahan aliran daya, sistem diasumsikan beroperasi pada kondisi di bawah keseimbangan sehingga digunakan model satu fasa.

Untuk memudahkan analisis sistem daya maka digunakan sistem per unit untuk memudahkan komputasi dengan menghilangkan satuan dan mengekspresikan kuantitas pada sistem dalam bentuk rasio tanpa dimensi. Pernyataan diatas dapat ditunjukkan dalam persamaan (2-1):

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\textbf{nilai sebenarnya}}{\textbf{nilai dasar}} \qquad (2\text{-}1)$$

Nilai impedansi dasar dapat dinyatakan dengan persamaan (2-2):

$$\text{Impedansi dasar } (Z_{base}) = \frac{(\textbf{kV_Dasar_ Line}-\textbf{Netral})^2 \times 1000}{\textbf{kVA_dasar_1}\emptyset} \qquad (2\text{-}2)$$

Dimana kV_Dasar_Line-Netral adalah tegangan dasar saluran ke netral dalam kilo Volt, dan kVA_dasar_1∅ adalah daya dasar satu fasa dalam kilo volt ampere.

Untuk kebutuhan analisis aliran daya dibutuhkan data-data dari bus dan data dari saluran transmisi. Data-data yang dibutuhkan untuk saluran transmisi yaitu resistansi saluran transmisi dalam p.u., reaktansi saluran transmisi dalam p.u., tap trafo (biasanya bernilai 1), dan rating tegangan dalam kilo Volt (kV). Sedangkan data pada masing-masing bus terdapat empat persyaratan yang dibutuhkan, yaitu *magnitude* tegangan ($|V|$) dalam p.u , sudut fasa (δ), daya nyata (P), dan daya reaktif (Q). Jenis *bus* pada umumnya dibagi menjadi tiga, yaitu (Saadat, 1999) :

a. *Slack bus* : salah satu *bus,* disebut *slack* atau *swing bus,* dianggap sebagai referensi ketika *magnitude* dan sudut fasa tegangan diketahui. *Bus* ini memperbaiki perbedaan antara beban dan sumber pembangkitan yang disebabkan oleh rugi-rugi pada jaringan. Rugi-rugi daya dan perubahan beban yang berfluktuasi dari sistem tak dapat diprediksi. Kekurangan daya inilah yang

ditampung dengan slack bus dengan mengirimkan daya P dan Q yang dapat berubah sesuai dengan kekurangan daya yang dialami.

b. *Load bus* : *bus* ini merupakan bus tempat beban-beban. Pada bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui yang datanya diambil dari nilai beban puncak data riwayat. *Magnitude* dan sudut fasa tegangan tidak diketahui. *Bus* ini disebut juga P-Q *bus*.

c. *Regulated bus* : *bus* ini disebut juga *bus* generator atau *voltaged – controlled buses*. Pada *bus* ini, daya nyata dan *magnitude* tegangan diketahui. Sudut fasa tegangan dan daya reaktif tidak diketahui. *Bus* in dikenal sebagai P-V *bus.*

2.1.1 Persamaan Aliran Daya

Dengan mempresentasikan saluran transmisi model PI seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 dimana impedansi sudah dikonversikan ke admitansi per unit, maka hasil persamaan untuk *bus* ialah (Saadat, 1999) :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \ldots + y_{in}(V_i - V_n)$$

$$= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \ldots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \cdots - y_{in}V_n \qquad (2\text{-}3)$$

Atau

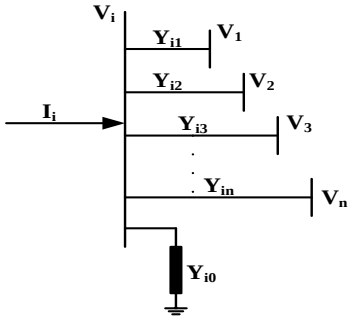
$$I_i = y_{ii}V_i + \sum_{j=1}^{n} y_{ij}V_j \quad j \neq i \qquad (2\text{-}4)$$

$$V_i = \frac{I_i}{y_{ii}} - \frac{1}{y_{ii}} \sum_{j=1}^{n} y_{ij}V_j \qquad (2\text{-}5)$$

dengan I_i = arus yang masuk ke bus *i*

V_i = tegangan pada bus *i*

y_{ij}=admitansi antara saluran *i* dan *j*



Gambar 2.1 Tipikal Bus pada Sistem Tenaga
Sumber : Saadat (1999:209)

Sementara persamaan untuk daya nyata dan daya reaktif pada *bus i* adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \qquad (2\text{-}6)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \qquad (2\text{-}7)$$

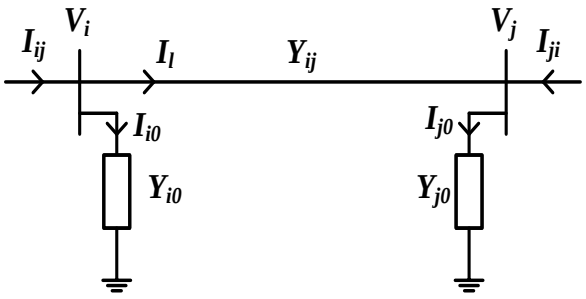
Dengan mensubstitusi persamaan 2.6 dan 2.7 maka :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii}V_i + \sum_{j=1}^{n} y_{ij}V_j \quad j \neq i \qquad (2\text{-}8)$$

keterangan P_i = daya nyata pada bus *i*

Q_i = daya reaktif pada bus *i*

Dari hubungan persamaan di atas, formulasi matematis pada masalah aliran daya menghasilkan sistem persamaan aljabar nonlinier yang harus diselesaikan dengan teknik iterasi. Untuk perhitungan aliran daya, diamsusikan aliran daya antara dua buah bus i dan j seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pemodelan Saluran Transmisi untuk perhitungan Aliran Daya
Sumber : Saadat (1999:212)

Dari Gambar 2.2, dimisalkan bahwa arus yang mengalir dari bus i menuju bus j atau arus I_{ij} bila ditinjau dari bus j maka arus tersebut bernilai positif, sehingga didapatkan persamaan :

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = Y_{ij}(V_i - V_j) + Y_{i0}V_i \qquad (2\text{-}9)$$

Bila ditinjau dari bus i, maka arus akan mengalir bernilai negatif seperti pada persamaan (2-10) :

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = Y_{ji}(V_j - V_i) + Y_{j0}V_j \qquad (2\text{-}10)$$

Persamaan daya kompleks Sij dari bus i menuju bus j dan daya kompleks S_{ji} dari bus j menuju bus i adalah sebagai berikut :

$$S_{ij} = V_iI_{ij}^* = V_i(V_i^* - V_j^*)Y_{ij}^* + V_iV_i^*Y_{i0}^* \qquad (2\text{-}11)$$

$$S_{ji} = V_jI_{ji}^* = V_j(V_j^* - V_i^*)Y_{ij}^* + V_jV_j^*Y_{j0}^* \qquad (2\text{-}12)$$

Sehingga dapat diketahui besar rugi-rugi daya yang timbul pada saluran transmisi sebagai berikut :

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \qquad (2\text{-}13)$$

Dengan S_{Lij} adalah total rugi-rugi daya pada saluran transmisi dalam mega-watt (MW), S_{ij} adalah daya saluran transmisi i-j dan S_{ji} adalah daya saluran transmisi j-i.

2.1.2 Solusi Aliran Daya dengan Metode *Newton Raphson*

Metode *Newton Raphson* merupakan metode yang sering digunakan dalam persamaan aljabar non linier. Hasil dari metode ini mendekati nilai sesungguhnya karena iterasi bertahap secara ekponensial.

Persamaan aljabar dalam bentuk matriks diberikan di bawah ini :

$$f(x)\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2\ (x) \\ . \\ . \\ . \\ f_N(x) \end{bmatrix} = y \qquad (2\text{-}14)$$

Dimana *y* dan *x* adalah vektor dan *f(x)* adalah fungsi vektor N. Jika diberikan nilai *y* dan *f(x)* dan ingin didapatkan nilai *x*, maka dibutuhkan suatu metode iterasi seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$0 = y - f(x) \qquad (2\text{-}15)$$

Dengan menambahkan Dx pada kedua sisi, di mana D adalah perkalian matrik N x N.

$$Dx = Dx + y - f(x) \qquad (2\text{-}16)$$

Kemudian persamaan di atas dikalikan kembali dengan D^{-1}, sehingga

$$x = x + y - D^{-1}[y - f(x)] \qquad (2\text{-}17)$$

Nilai lama dianggap x(i) digunakan pada sisi kanan untuk menghasilkan nilai baru x(i+1),

$$x(i+1) = x(i) + D^{-1}\{y - f|x(i)|\} \qquad (2\text{-}18)$$

Untuk persamaan nonlinier, nilai matriks D harus diketahui. Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai D adalah *Newton – Raphson* yang didasarkan pada deret Taylor.

$$y = f(x_0) + \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x_0} (x - x_0) \ldots \qquad (2\text{-}19)$$

Dengan mengabaikan pangkat yang lebih tinggi dari persamaan d atas, maka untuk menyelesaikan nilai x,

$$x = x_0 + \left[\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x_0}\right]^{-1} [y - f(x_0)] \qquad (2\text{-}20)$$

Metode *Newton–Raphson* mengganti nilai x_0 yang menggunakan nilai lama dengan x(i) dan x menjadi nilai baru x (i+1), sehingga

$$x(i+1) = x_i + J^{-1}(i)\{y - f[x\,(i)]\} \tag{2-21}$$

$$J\,(i) = \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \tag{2-22}$$

Untuk sistem daya yang besar, metode *Newton-Raphson* dinilai lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk memperoleh suatu solusi tidak tergantung pada ukuran suatu sistem. Pada suatu sistem tenaga, arus yang memasuki bus dapat ditulis ulang dalam bentuk matriks admitansi seperti persamaan berikut (Saadat, 1999) :

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \tag{2-23}$$

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}|\,|V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \tag{2-24}$$

Daya kompleks pada bus *i* adalah :

$$P_i - jQ_i = V^*{}_i I_i \tag{2-25}$$

Subtitusi dari dua persamaan di atas

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i I_i \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}|\,|V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \tag{2-26}$$

Dengan memisahkan bagian *real* dan imajiner, maka

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2-27}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2-28}$$

Keterangan : I_i = arus pada bus *i*

V_i = tegangan pada bus *i*

V_j = tegangan pada bus *j*

Y_{ij} =admitansi antara bus *i* dan *j*

P_i = daya aktif pada bus *i*

Q_i = daya reaktif pada bus *i*

θ_{ij} = sudut polar admitansi Y_{ij}

δ_j = sudut tegangan V_j

Dengan menjabarkan kedua persamaan di atas menggunakan deret Taylor, maka persamaan linear dalam bentuk matriksnya adalah :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^k{}_2 \\ \vdots \\ \Delta P^k{}_n \\ \Delta Q^k{}_2 \\ \vdots \\ \Delta Q^k{}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^k{}_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta^k{}_n \\ \Delta |V^k{}_2| \\ \vdots \\ \Delta |V^k{}_n| \end{bmatrix} \quad (2\text{-}29)$$

Pada persamaan di atas, bus 1 dianggap sebagai *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan hubungan antara perubahan kecil pada sudut tegangan $\Delta\delta^k{}_i$ dan *magnitude* tegangan $\Delta|V^k{}_i|$dan dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif $\Delta P^k{}_i$ dan $\Delta Q^k{}_i$. Elemen-elemen diatas merupakan pada matrik Jacobian merupakan turunan parsial dari persamaan (2-27) dan persamaan (2-28). Dalam bentuk yang lebih singkat, matriks di atas dapat ditulis sebagai :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2\text{-}30)$$

Elemen J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}31)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2\text{-}32)$$

Elemen J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}|\cos\theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}33)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2\text{-}34)$$

Elemen J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}35)$$

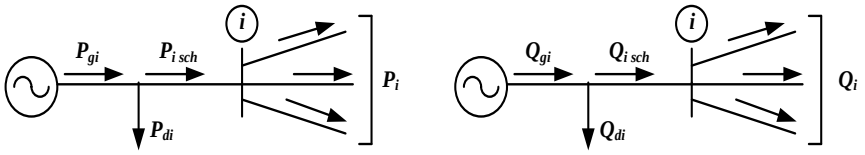
$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2\text{-}36)$$

Elemen J_4 adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}|\sin\theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}37)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2\text{-}38)$$

Dalam Gambar 2.3 diperlihatkan aliran kesetimbangan daya pada bus i.



Gambar 2.3 a) Daya aktif pada ketimbangan daya bus i b) Daya reaktif pada kesetimbangan daya bus i
Sumber : Grainger & Stevenson (1994:331)

Dari Gambar diatas didapatkan persamaan daya spesifikasi (*scheduling*) sebagai berikut :

$$P^{sch}_i = P_{gi} - P_{di} \quad (2\text{-}39)$$

$$Q^{sch}_i = Q_{gi} - Q_{di} \quad (2\text{-}40)$$

Dimana P_{gi} merupakan daya aktif yang dibangkitkan di generator bus i dan P_{di} merupakan daya total beban aktif dalam bus tersebut. Begitu pula dengan daya reaktif. $\Delta P^k{}_i$ dan $\Delta Q^k{}_i$ adalah selisih antara nilai yang diharapkan dan nilai sebenarnya atau dikenal sebagai daya residu, dirumuskan dengan :

$$\Delta P^k{}_i = P^{sch}{}_i - P^k{}_i \quad (2\text{-}41)$$

$$\Delta Q^k{}_i = Q^{sch}{}_i - Q^k{}_i \quad (2\text{-}42)$$

Perkiraan nilai baru untuk tegangan bus adalah:

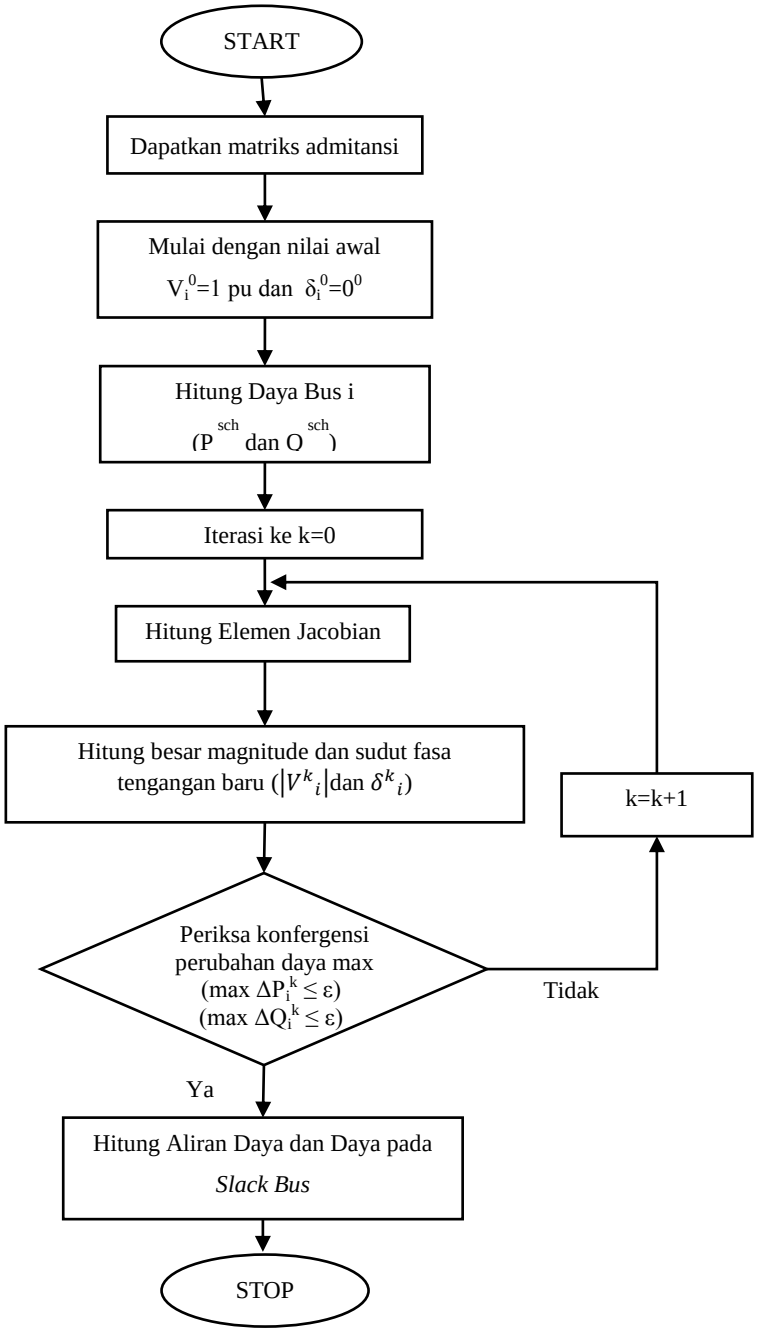
$$\delta^{(k+1)}{}_i = \delta^k{}_i + \Delta\delta^k{}_i \quad (2\text{-}43)$$

$$\left|V^{(k+1)}{}_i\right| = |V^k{}_i| + |\Delta V^k{}_i| \quad (2\text{-}44)$$

Prosedur penyelesaian masalah dengan menggunakan metode *Newton - Rapshon* adalah sebagai berikut (Saadat, 1990) :

1. Pada bus – bus beban, dimana $P^{sch}{}_i$ dan $Q^{sch}{}_i$ sudah diketahui, *magnitude* tegangan dan sudut fasa diatur sama seperti nilai *slack bus*, atau 1.0 dan 0.0, contoh., $|V^0{}_i| = 1.0$ dan $\delta^0{}_i = 0.0$. Untuk bus PV dimana nilai $|V_i|$ dan $P^{sch}{}_i$ diketahui, sudut fasa diatur sama seperti nilai *slack bus* atau 0, contoh $\delta^0{}_i = 0.0$.
2. Untuk bus – bus beban nilai $P^{(k)}{}_i$ dan $Q^{(k)}{}_i$ serta $\Delta P^{(k)}{}_i$ dan $\Delta Q^{(k)}{}_i$dihitung menggunakan rumus 2.39, 2.40, 2.41, dan 2.42 secara berturut – turut.
3. Untuk bus – bus PV, nilai $P^{(k)}{}_i$dan $\Delta P^{(k)}{}_i$ dihitung dengan rumus 2.28 dan 2.41 secara berturut – turut.
4. Elemen matriks Jacobian (J_1, J_2, J_3, J_4) dihitung dengan menggunakan rumus 2.30 sampai 2.38.
5. Nilai tegangan dan sudut fasa yang baru di dapatkan dengan rumus 2.43 dan 2.44 secara berturut – turut.

6. Proses akan terus dikerjakan hingga nilai residu atau selisih $\Delta P^k{}_i$ dan $\Delta Q^k{}_i$ kurang dari nilai keakuratan spesifik ϵ.
7. Hitung aliran daya system dan daya pada *Slack bus*



Gambar 2.4 Diagram Alir Perhitungan Aliran Daya dengan *Newton Raphson*
Sumber : Pranyata (2014:15)

1.2 Daya Reaktif dan Pengaturan Tegangan

Jatuh tegangan merupakan penurunan tegangan dari sistem pembangkit sampai sepanjang saluran jaringan tegangan menengah. Sedangkan rugi daya adalah selisih antara daya yang dibangkitkan dengan daya yang diterima oleh pelanggan listrik. Kedua hal ini disebabkan oleh kawat saluran yang mempunyai nilai resistansi, induktansi, kapasitansi. Untuk meminimalisasi kedua hal tersebut maka perlu adanya kompensasi daya reaktif dan pengaturan tegangan.

Untuk operasi sistem daya yang efisien dan handal, pengaturan tegangan dan daya reaktif harus memenuhi syarat sebagai berikut (Kundur, 1994) :

1. Tegangan terminal pada seluruh peralatan dalam sistem berada pada batas yang diijinkan.
2. Kestabilan sistem dapat ditingkatkan dengan memaksimalkan pemanfaatan sistem transmisi. Pengaturan tegangan dan daya reaktif memiliki pengaruh yang signifikan terhadapa kestabilan sistem.
3. Daya reaktif yang diminimalisasi turut mengurangi rugi I^2R dan I^2X hingga nilai minimum sehingga menjamin keefisienan operasi dalam sistem.

Masalah dalam menjaga tegangan agar tetap berada pada batas yang diijinkan menjadi rumit seiring semakin bertambahnya beban. Semakin banyak beban, semakin banyak pula daya reaktif yang dibutuhkan. Karena daya reaktif tidak dapat ditransmisikan pada jarak yang jauh, pengaturan tegangan dapat menjadi lebih efektif dengan menggunakan perangkat khusus yang dipasang secara tersebar pada sistem.

Kinerja saluran transmisi, khususnya untuk model menengah dan panjang, dapat diperbaiki dengan menggunakan kompensasi reaktif, baik tipe seri maupun paralel. Kompensasi ini menyediakan jenis kompensasi pasif. Mereka secara permanen terhubung pada sistem transmisi dan sistem distribusi dan berkontribusi untuk mengatur tegangan dengan memodifikasi karakteristik jaringan.

Kompensasi seri terdiri atas kapasitor *bank* yang ditempatkan secara seri pada masing–masing fasa pada saluran konduktor. Kompensasi seri berfungsi untuk mengurangi impedansi seri pada saluran yang menyebabkan jatuh tegangan sehingga sangat menentukan besar daya yang dapat ditransmisikan. Jatuh tegangan akibat impedansi jaringan dapat dinyatakan sebagai berikut (Astuti, 2014).

$V_d = I\,(R_L \cos \varphi + X_L \sin \varphi)$ volt (2-45)

Dengan dipasang kapasitor seri, maka persamaannya menjadi :

$V_d = IR_L \cos \varphi + I(X_L - X_C) \sin \varphi$ volt (2-46)

Dengan :

V_d = Jatuh tegangan saluran

I = Arus saluran

R_L = Tahanan saluran

X_L = Reaktansi saluran

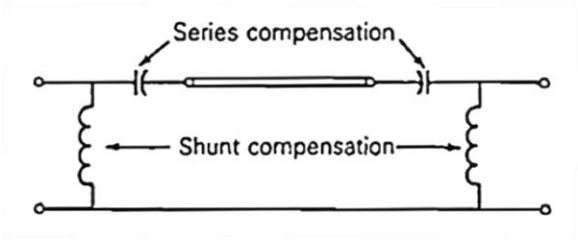
Jika $(X_L - X_C) = 0$ maka besarnya jatuh tegangan hanya dipengaruhi tahanan saluran saja, sehingga nilainya akan lebih kecil daripada tanpa dipasang kapasitor. Namun kerugian dari kapasitor *bank* ini ialah perangkat proteksi otomatis harus dipasang agar mampu memotong arus lebih selama terjadi gangguan dan mengaplikasikan kembali kapasitor *bank* setelah gangguan berhasil diatasi. Selain itu penambahan kapasitor *bank* dapat menguatkan osilasi frekuensi rendah yang dikenal sebagai fenomena resonansi *subsinkron* yang bisa membahayakan batang poros antara turbin dan generator.

Sedangkan kompensasi *shunt* merujuk pada penempatan induktor dari masing – masing saluran ke netral. Induktor digunakan untuk menyerap daya reaktif dan mengurangi kelebihan tegangan selama kondisi beban ringan. Induktor juga berfungsi mengurangi transien kelebihan tegangan karena penskalaran surja petir. Kapasitor *shunt* terkadang juga dimanfaatkan untuk mengirim daya reaktif dan meningkatkan tegangan transmisi selama kondisi beban lebih.

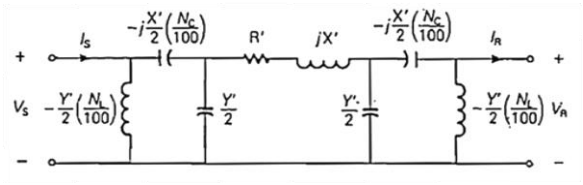
Tipe kompensasi *shunt* yang lainnya ada *thyristor – switched reactors* yang dipasang secara paralel dengan kapasitor. Perangkat seperti ini disebut *static var compensator* (SVC) yang menyediakan kompensasi aktif. SVC dapat menyerap daya reaktif selama beban ringan sekaligus mampu mengirimkan daya reaktif selama beban lebih secara otomatis. Melalui kontrol otomatis pada saklar *thyristor*, fluktuasi tegangan diminimalisasi dan kemampuan saluran untuk dibebani atau kapabilitas penyaluran daya semakin meningkat. Sehingga SVC dapat bekerja secara dinamis menyesuaikan kondisi beban dan sistem.

Gambar 2.5 (a) menunjukkan rangkaian yang telah dipasang kompensasi seri dan kompensasi *shunt*. Pada gambar (b) menunjukkan skema dan rangkaian ekivalen untuk bagian saluran kompensasi dimana N_C adalah jumlah kompensasi

seri kapasitif yang diekspresikan dalam persen pada saluran impedansi urutan positif dan N_L adalah jumlah kompensasi reaktif *shunt* dalam persen.



(a)



(b)

Gambar 2.5 (a) Rangkaian kompensasi seri dan *shunt,* (b) Rangkaian Ekivalen saluran kompensasi.
Sumber : Saadat (1999,p.168)

1.3 Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif yang terdiri dari beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan kapasitas kapasitif tertentu. Besaran parameter yang sering dipakai adalah KVAR meskipun pada kapasitor sendiri tercantum besaran kapasitansi yaitu farad atau mikrofarad. Kapasitas kapasitor dari ukuran 5 KVAR sampai 60 KVAR. Dari tegangan kerja 230 volt sampai 525 volt. Kapasitor ini mempunyai sifat listrik yang kapasitif (*leading)*, sehingga mempunyai sifat mengurangi atau menghilangkan sifat induktif (*lagging)*.

Fungsi utama dari kapasitor bank yaitu sebagai penyeimbang beban induktif. Seperti yang diketahui beban listrik terdiri dari beban reaktif (R), induktif (L), dan kapasitif (C) dimana peralatan listrik yang sering digunakan dan dijumpai memiliki karakteristik induktif, sehingga untuk menyeimbangkan karakteristik beban tersebut perlu digunakan kapasitor yang berperan sebagai beban kapasitif. Beberapa kegunaan dari kapasitor bank yaitu memperbaiki faktor daya, menyuplai daya reaktif sehingga memaksimalkan penggunaan daya kompleks (KVA), mengurangi jatuh tegangan, menghindari kelebihan beban transformer, memberikan tambahan daya, dan dapat menghemat daya.

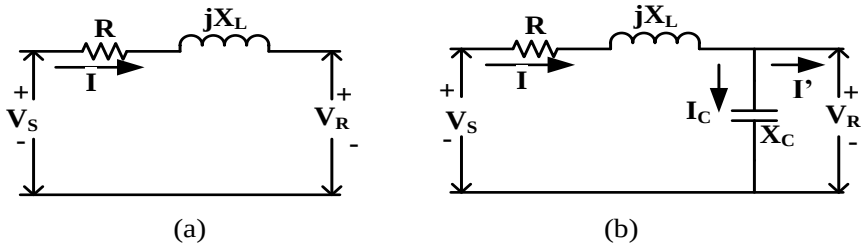
Pada Gambar 2.6 ditunjukkan rangkaian ekivalen saluran transmisi sebelum dan setelah dipasang kapasitor bank. Penurunan tegangan pada saluran transmisi sebelum kapasitor dipasang ditunjukkan pada Persamaan (2-47).

$$VD = I_R R + I_X X_L \quad (2\text{-}47)$$

Setelah kapasitor ditempatkan secara paralel pada akhir saluran transmisi, maka persamaan penurunan tegangannya ditunjukkan seperti pada Persamaan (2-48).

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_C \quad (2\text{-}48)$$

Dengan VD adalah penurunan tegangan dalam volt, R adalah resistansi saluran dalam ohm, X_L adalah reaktansi induktif saluran dalam ohm, X_C adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor dalam ohm, I_R adalah komponen daya nyata dari arus dalam ampere, I_X adalah komponen reaktif arus tertinggal dalam ampere, I_C adalah komponen reaktif arus mendahului dalam ampere, dan V_R adalah tegangan sisi terima dalam volt (Erviana, 2012).



Gambar 2.6 (a) Rangkaian Ekivalen Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank (b) Rangkaian Ekivalen Setelah Pemasangan Kapasitor Bank
Sumber : Erviana (2012)

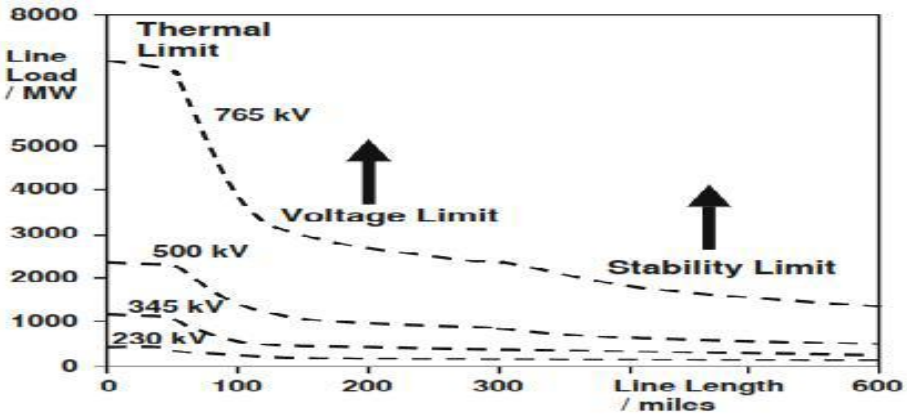
1.4 FACTS (*Flexible AC Transmission System*)

Sistem penyaluran tenaga listrik dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem transmisi dan sistem distribusi. Pada sistem transmisi saat ini, diketahui bahwa sistem transmisi listrik DC lebih efisisen daripada transmisi tenaga listrik AC. Namun, pada kenyataannya terdapat lebih banyak saluran transmisi AC daripada transmisi listrik DC, hal ini disebabkan karena pembuatan saluran transmisi listrik DC membutuhkan biaya yang besar dan untuk mengubah dari saluran transmisi listrik AC yang telah ada menjadi saluran transmisi listrik DC diperlukan waktu yang lama dan biaya yang besar, oleh karena itu pengembangan peralatan yang dapat memaksimalkan transmisi energi listrik AC menjadi solusi utama dalam penyaluran sistem tenaga listrik. Pengembangan *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) merupakan solusi yang dapat dipakai dalam memaksimalkan transmisi listrik AC. Penggunaan FACTS dalam

saluran transmisi memiliki tujuan utama yaitu mengoperasikan saluran transmisi sampai batas termalnya. Tanpa FACTS, saluran masih tetap menyalurkan banyak energi listrik akan tetapi dengan suatu persentasi daya reaktif yang relatif besar. FACTS dapat meningkatkan stabilitas sistem, mengontrol tegangan dan redaman (*damping*) osilasi daya. Hal tersebut menjadi alasan utama mengapa sangat diperlukan mempelajari stabilitas sistem energi listrik dengan mempertimbangkan pemakaian FACTS pada saluran transmisi. Aplikasi dasar dari peralatan FACTS antara lain (Enrique, 2004) :

1. Kontrol aliran daya
2. Meningkatkan kemampuan transmisi
3. Kontrol tegangan
4. Kompensasi daya reaktif
5. Meningkatkan stabilitas
6. Meningkatkan kualitas daya
7. *Power conditioning*
8. Mitigasi *flicker*
9. Interkoneksi energi terbaharukan

Pengaruh peralatan FACTS dapat dicapai dengan mengatur kompensasi *shunt* dan kompensasi seri. Dengan menggunakan komponen elektronika daya, maka reaksi kerja dari FACTS diperoleh dalam waktu singkat yang kurang dari satu detik.

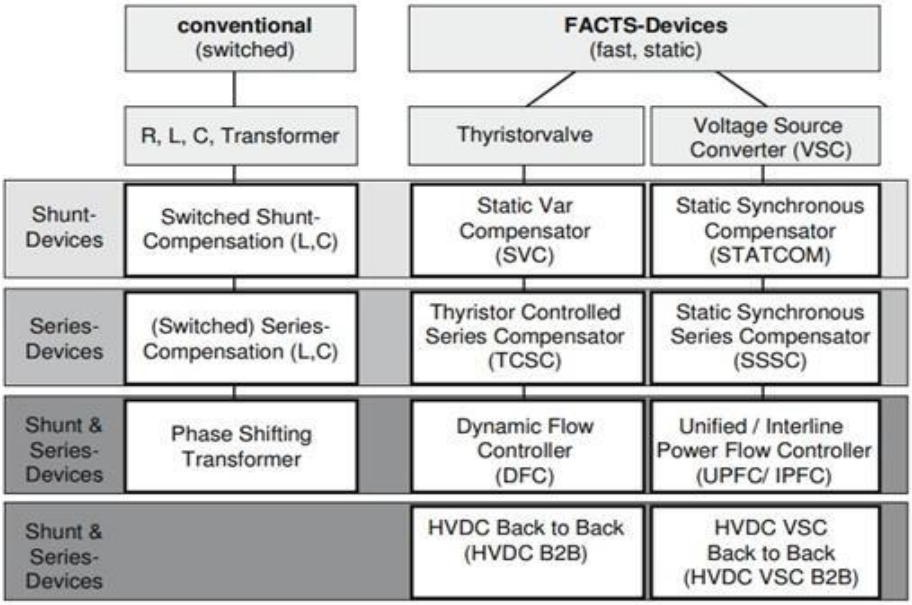


Gambar 2.7 Batas Operasi Dari Saluran Transmisi Untuk Berbagai *Level* Tegangan yang Berbeda
Sumber : Zhang (2006)

Batas operasi dari saluran transmisi menunjukkan kemampuan kerja saluran dalam sistem tenaga listrik. Melalui gambar 2.7 dapat dilihat hubungan antara beban saluran dan panjang saluran, batas *termal*, batas tegangan, dan batas stabilitas dari

saluran. Semakin besar beban saluran dan semakin panjang saluran transmisi maka tingkat kestablian transmisi akan menurun, semakin besar beban saluran dan semakin kecil panjang dari saluran maka batas *termal* saluran akan meningkat. Pada peralatan FACTS terdapat bentuk ‘dinamis’ dan ‘statis’, dimana bentuk ‘dinamis’ pada FACTS digunakan untuk mengekspresikan kecepatan pengendalian peralatan FACTS yang diperoleh dari pengggunaan komponen elektronika daya. Ini adalah salah satu faktor utama yang membedakannya dari peralatan konvesional. Bentuk ‘statis’ berarti peralatan itu tidak mempunyai bagian yang bergerak seperti saklar mekanis untuk melakukan pengendalian dinamis. Oleh karena itu sebagian besar peralatan FACTS dapat berbentuk statis dan dinamis.

Pada gambar 2.8 dapat dilihat jenis-jenis dari FACTS, dimana pada kolom sebelah kiri gambar 2.8 diperlihatkan peralatan konvensional yang dibuat berdasarkan sifat *switch* tetap atau mekanis komponen-komponennya seperti resistansi, induktansi atau kapasitansi bersama dengan transformator.



Gambar 2.8 Peralatan FACTS Utama
Sumber : Zhang (2006)

Pada kolom sebelah kanan peralatan FACTS berupa peralatan statik yang menggunakan *thyristor*. Peralatan terhubung *shunt* untuk mengkompensasi daya reaktif dan kontrol tegangan. Pada dasarnya pengembangan FACTS sangat berkaitan erat dengan pengaplikasian *thyristor* untuk elektronika daya.

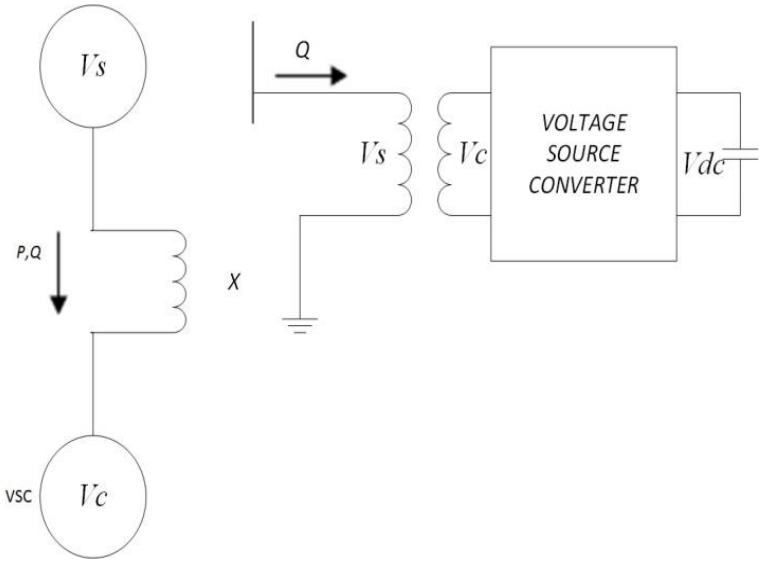
Pada sistem tenaga listrik dalam pengontrolannya, FACTS dapat dihubungkan secara seri, *shunt*, dan dapat pula dihubungkan kedua-duanya dengan

sistem. STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) merupakan salah satu dari peralatan FACTS yang akan dibahas dalam skripsi ini.

1.5 *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)

STATCOM dikategorikan sebagai teknologi baru dalam bidang kompensator daya reaktif. STATCOM mampu menghasilkan nilai harmonik yang kecil dan nilai tegangan AC yang terkendali sebagai *outputnya.* Nilai-nilai tersebut dapat mempengaruhi nilai-nilai daya reaktif. Selain itu STATCOM juga mampu berfungsi untuk mengkompensasi beberapa masalah lain seperti flicker, impedansi hantaran pada sistem transmisi, dan perbedaan sudut fasa.

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 2.9 dan dijelaskan pada persamaan (2-49), (2-50), dan (2-51) yang menunjukkan pengiriman daya aktif dan reaktif antara Vs Grid dan Vc STATCOM (Zainuddin, 2015,pp.218-224).



Gambar 2.9 Prinsip Kerja pada sistem STATCOM
Sumber : Zainuddin (2015)

$$P = \frac{V_S V_C \sin\delta}{X_L} \quad (2\text{-}49)$$

$$Q = \frac{V_S(V_S - V_C \cos\delta)}{X_L} \quad (2\text{-}50)$$

$$S = 3\frac{V_S V_C}{X_L}\sin\delta - j3\left(\frac{V_S V_C}{X_L}\cos\delta - \frac{V_S {V_S}^2}{X_L}\right) = P - jQ \quad (2\text{-}51)$$

Keterangan :

S = Daya kompleks (VA),

Vc = Tegangan terminal Statcom,

Vs = Tegangan dari Grid/Sistem,

P = Daya aktif (W),

XL = Reaktansi (kabel) = ωL

Q = Daya reaktif (Var),

δ = Beda fasa antara *Vs* dan *Vc*

Aliran daya aktif akan mencapai maksimum ketika sudut fase δ adalah 90º. Dalam prakteknya, faktor daya harus diatas 0,85 s.d 0.9 sehingga sudut daya nilainya kecil (sekitar 25º). Hal ini ditujukan untuk menjaga sistem stabil dari transien dan osilasi dinamis. Oleh karena itu sudut daya berpengaruh langsung terhadap aliran daya aktif (persamaan 2-49) sedangkan aliran daya reaktif dipengaruhi oleh perubahan tegangan antar bus, karena cos δ mendekati 1 (persamaan 2-50).

Pada kondisi belum ada kompensasi maka tipikal saluran transmisi adalah beban induktif dimana arus tertinggal (lagging) terhadap tegangannya. Garis beban sistem digambarkan seperti gambar 2.10, apabila beban sistem semakin induktif maka arus semakin tertinggal sedangkan Q juga semakin besar artinya semakin menyerap daya reaktif, sebaliknya apabila semakin kapasitif maka arus mendahului (*leading*) terhadap tegangan V dan menyuplai daya reaktif Q.

$$\Delta V = E - V = Z_S . I \qquad (2\text{-}52)$$

Keterangan :

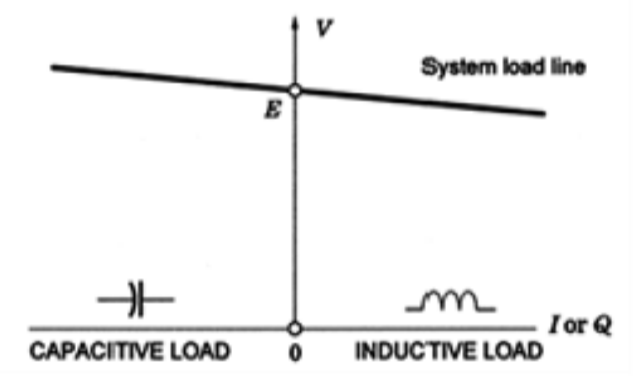
I = Arus beban ; E = Tegangan referensi

Zs = Impedansi saluran ; ΔV = Drop tegangan

Daya komplek beban per fasa didefinisikan dengan persamaan :

$$I = \frac{P - jQ}{V} \qquad (2\text{-}53)$$

dan jika V=V + j0 diambil sebagai phasor referensi , kita dapat menuliskan



Gambar 2.10 Garis Beban sistem

$$\Delta V = (R_S + jX_s)\left(\frac{P-JQ}{V}\right) + j\left(\frac{R_S P + X_S Q}{V}\right) - j(\frac{X_S - R_S Q}{V}) \quad (2\text{-}54)$$

$$\Delta V = \Delta VR \quad (2\text{-}55)$$

dan

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{X_S Q}{V^2} \approx \frac{Q}{S} \quad (2\text{-}56)$$

maka

$$V \approx (1 - \frac{Q}{S}) \quad (2\text{-}57)$$

Artinya bahwa dengan mengubah nilai Q maka akan berpengaruh terhadap tegangan bus. Semakin besar nilai Q yang disuplai maka tegangan V juga akan naik. Dengan menambahkan impedansi kompensasi atau kompensator terpasang parallel dengan beban , maka sangat mungkin untuk menjaga |V| = |E|. Pada kompensator daya reaktif , daya reaktif beban digantikan dengan jumlah $Q_S = Q + Q_\gamma$ dan daya reaktif kompensator Q_γ diatur sedemikian rupa sehingga memutar phasor ΔV sehingga |V| = |E|.

$$|E|^2 = [V + \frac{R_S P + X_S Q_S}{V}]^2 + [\frac{X_S P + R_S Q_S}{V}]^2 \quad (2\text{-}58)$$

Secara umum, STATCOM dapat dioperasikan untuk melakukan tujuan sebagai berikut:

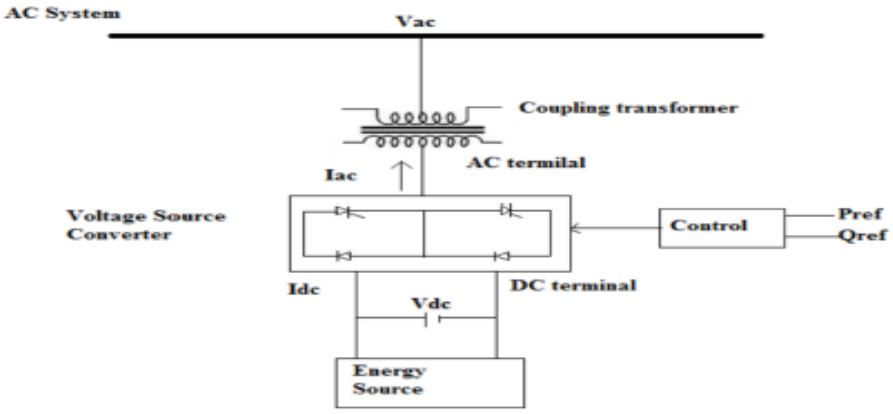
1. Pengatur Tegangan
2. Koreksi Faktor Daya
3. Penyeimbang Beban
4. Kompensasi *Harmonic*

1.5.1 Komponen Utama STATCOM

STATCOM pada dasarnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu :

1. *Voltage Source Compensator*(VSC)
2. Transformator kopling
3. Pengontrol

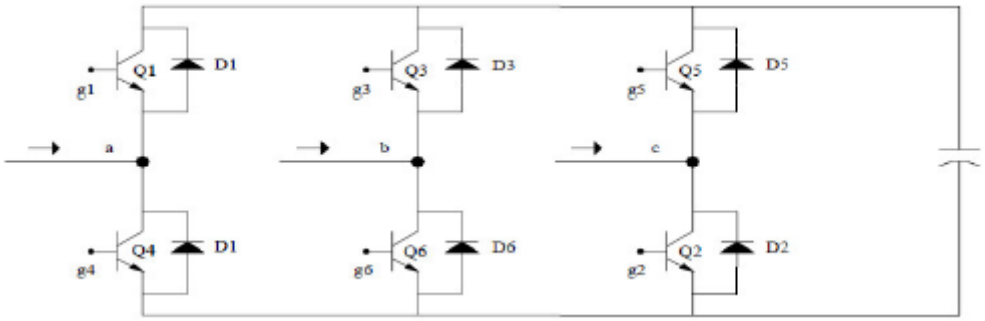
4. Penyimpan energi DC



Gambar 2.11 Komponen Utama STATCOM
Sumber : Kadandani & Maiwada (2015)

1.5.1.1 *Voltage Source Converter* (VSC)

VSC merupakan suatu piranti elektronika daya yang mampu menghasilkan tegangan sinusoidal dengan frekuensi, besar dan sudut fasa sesuai yang diinginkan. Dengan mengubah tegangan DC pada perangkat penyimpanan ke dalam satu set tiga fase keluaran tegangan AC. Tegangan berada dalam fase dan digabungkan dengan sistem AC melalui reaktansi transformator kopling. Fungsi VSC sebagai rectifier saat STATCOM menyerap daya reakif dari sistem dan inverter saat STATCOM menyuplai daya reaktif ke sistem, Tegangan yang hilang dalam hal ini adalah perbedaan antara tegangan nominal dan aktual. VSC biasanya didasarkan pada beberapa jenis penyimpan energi yang akan memasok tegangan DC dan tegangan yang diinginkan kemudian diperoleh dengan mengalihkan perangkat elektronik *solid-state* di sirkuit *converter* (Sivakoti, 2013,p.748-752).



Gambar 2.12 Konverter Sumber Tegangan Tiga Fasa
Sumber : Sivakoti (2013)

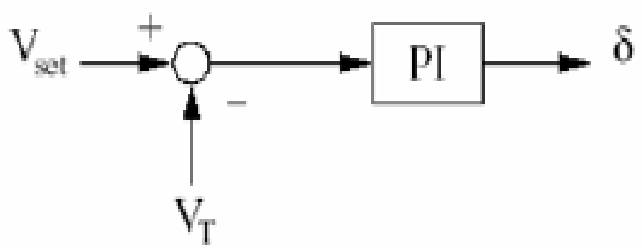
1.5.1.2 Kopling Transformator

Kopling transformator dibutuhkan untuk menurunkan tegangan sistem agar sesuai dengan jaringan *utilitas*. Sebuah reaktor kopling biasanya digabungkan agar dapat menyaring komponen arus harmonisa yang dihasilkan oleh lonjakan tegangan *output* dari VSC. Perbedaan reaktansi kebocoran tegangan AC menghasilkan pertukaran daya reaktif antara STATCOM dan pada sistem tenaga listrik, dengan demikian bahwa tegangan AC di bus bar dapat diatur untuk meningkatkan profil tegangan dari sistem tenaga, yang merupakan tugas utama dari STATCOM. Atau, fungsi redaman sekunder dapat ditambahkan ke dalam STATCOM untuk meningkatkan stabilitas osilasi sistem tenaga.

1.5.1.3 Pengontrol

Pengontrol melakukan kontrol umpan balik dan *output* dalam satu set tegangan yang mempengaruhi sinyal untuk menggerakkan saklar utama semikonduktor dari konverter daya. Hal Ini membangkitkan pengalihan sinyal pada STATCOM yang digunakan untuk mengaktifkan STATCOM dalam menginjeksikan arus reaktif ke *grid* untuk bertindak sebagai *over-excited* generator sinkron (atau kapasitor) sehingga menaikan tegangan *grid* atau menyerap reaktif saat ini dan berperilaku seperti generator sinkron *under-excited* (atau induktor) yang cenderung menurunkan tegangan *grid*. Kompensator STATCOM bervariasi sesuai dengan strategi pengendalian (Tajavoth, 2013).

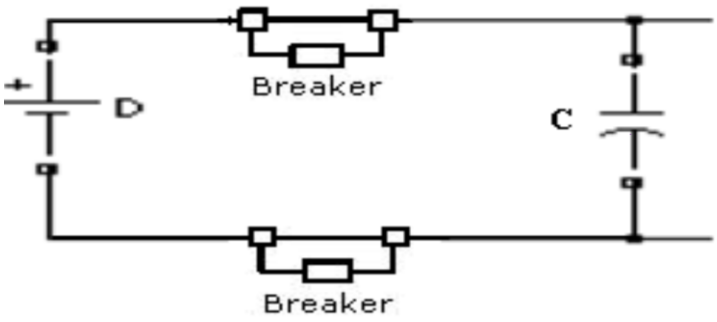
Fungsi utama dari pengontrol adalah menjaga tegangan agar besarnya konstan pada titik di mana beban sensitif terhubung, di bawah gangguan sistem. Hal ini dilakukan dengan mengukur dan membandingkan tegangan r.m.s pada titik beban dengan tegangan referensi. Perbedaan antara dua nilai adalah sinyal *error* yang berfungsi sebagai *input* ke pengontrol. *Output* adalah sudut daya δ yang disediakan untuk generator sinyal PWM. Dengan demikian, sinyal *error* diproses menghasilkan sudut daya δ yang diinginkan, yang akan mengarahkan kesalahan nol, sehingga memulihkan nilai r.m.s dari tegangan beban dengan nilai tegangan referensi.



Gambar 2.13 Blok Diagram dari pengontrol STATCOM
Sumber : Kadandani & Maiwada (2015)

1.5.1.4 Sumber Energi DC

Sumber tegangan DC dapat disediakan oleh kapasitor yang terhubung di sisi DC dari VSC atau *Battery Energy Storage System* (BESS). Sumber energi DC terhubung secara paralel dengan kapasitor DC. Ini membawa masukan arus *ripple* dari konverter. Kapasitor dapat diisi oleh VSC atau dengan BESS. Fungsi BESS adalah untuk mendukung sumber daya nyata di bawah kondisi daya yang berfluktuasi. Dengan demikian, agar dapat mencapai pengaturan tegangan yang diperlukan, BESS terhubung secara paralel dengan kapasitor DC dari STATCOM sehingga menjadikannya sebagai elemen penyimpan energi. BESS kemudian akan menyuntikkan atau menyerap daya reaktif yang diperlukan untuk menstabilkan sistem *grid* dengan tetap mempertahankan kapasitor DC dalam tegangan konstan. Dengan kata lain, mengisi daya dan melepaskan daya untuk memperbaiki profil tegangan. Dengan demikian, penyimpan energi DC bertanggung jawab untuk menyediakan dan menyerap daya nyata yang sedang ditukarkan oleh sistem transmisi di terminal DCnya (Malarvizhi & Baskaran 2010).



Gambar 2.14 Sumber energi DC
Sumber : Malarvizhi & Baskaran (2010)

1.6 *Bacterial Foraging Optimization* (BFO)

*Bacterial Foraging Optimization (*BFO**)** diusulkan oleh Kevin Passino (2002), adalah pendatang baru untuk keluarga algoritma optimasi. Penerapan strategi kelompok mencari makan dari sekawanan bakteri *E.coli* dalam fungsi *multi-optimal* optimasi adalah ide kunci dari algoritma baru ini. Pencarian nutrisi oleh bakteri adalah cara untuk memaksimalkan energi yang diperoleh per satuan waktu. Bakteri secara individu juga berkomunikasi dengan yang lain dengan cara mengirimkan sinyal. Sebuah bakteri mengambil keputusan mencari makan setelah mempertimbangkan dua faktor sebelumnya. Proses, dimana bakteri bergerak dengan mengambil langkah-langkah kecil ketika mencari nutrisi, disebut *chemotaxis*. Ide kunci dari BFOA yang meniru gerakan *chemotaxis* bakteri virtual dalam ruang pencarian masalah.

S : Total jumlah bakteri dalam populasi,
N_C : Jumlah langkah *chemotaxis*,
N_S : Panjang *swim*.
N_{re} : Jumlah langkah reproduksi,
N_{ed} : Jumlah kejadian *elimination* dan *dispersal*,
P_{ed} : Probabilitas *elimimination* dan *dispersal*,
C (i) : Ukuran langkah yang diambil dalam arah acak ditentukan oleh jatuh tersebut.

Teori mencari makan didasarkan pada asumsi bahwa pencarian makan pada binatang untuk memperoleh nutrisi dengan cara yang memaksimalkan asupan energi (E) mereka per satuan waktu (T) dalam mencari makan. Oleh karena itu, mereka mencoba untuk memaksimalkan fungsi seperti E/T (atau mereka memaksimalkan jangka panjang rata-rata asupan energi mereka). Maksimalisasi fungsi seperti memberikan sumber nutrisi untuk bertahan hidup dan waktu tambahan untuk kegiatan penting lainnya (misalnya, melawan, kabur, perkawinan, bereproduksi, tidur, dan lain-lain). Jelas, mencari makan sangat berbeda untuk spesies yang berbeda. *Herbivora* umumnya menemukan makanan dengan mudah tetapi harus makan dalam jumlah banyak. *Karnivora* umumnya merasa sulit untuk menemukan makanan tetapi tidak harus makan banyak karena makanan mereka memiliki nilai energi yang tinggi. "Lingkungan" menetapkan pola nutrisi yang tersedia (misalnya, melalui organisme lain yang membutuhkan nutrisi yang tersedia, kendala geologi seperti sungai, pegunungan dan pola cuaca) dan kendala yang lain untuk memperoleh makanan

(misalnya, porsi kecil makanan mungkin dipisahkan oleh jarak yang jauh). Selama mencari makan bisa ada risiko disebabkan oleh predator, mangsa mungkin bergerak sehingga harus dikejar dan karakteristik fisiologis penjelajah membatasi kemampuan dan keberhasilan. *Bacterial Foraging Optimization* dijelaskan dengan mengikuti langkah-langkah berikut :

1. *Chemotaxis*

   Proses ini mensimulasikan gerakan dari sel *E.coli* dengan berenang dan jatuh melalui *flagela*. Secara biologi sebuah bakteri *E.coli* dapat bergerak dalam dua cara yang berbeda. Hal ini dapat berenang untuk jangka waktu lama dalam arah yang sama atau mungkin jatuh dan bergantian antara kedua mode operasi untuk seumur hidup. Misalkan θ^i (j, k, l) merupakan bakteri i^{th} pada j^{th} *chemotaxis*, k^{th} reproduksi dan l^{th} langkah *elimination dan dispersal*. C (*i*) adalah ukuran langkah yang diambil dalam arah acak ditentukan oleh t*umble* (langkah satuan panjang). Kemudian pada *Chemotaxis* komputasi pergerakan bakteri dapat diwakili oleh

   $$\theta^i(j+l.k,l) = \theta^i(j,k,l) + C(i)\frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (2\text{-}59)$$

   Dimana Δ adalah indikasi arah secara acak pada elemen dalam [-1, 1].

2. Bergerombol

   Tingkah laku kawanan yang menarik telah diamati untuk beberapa motil spesies bakteri termasuk *E.coli* dan *S. typhimurium* yang rumit dan pola *spatio-temporal* yang stabil terbentuk pada daerah nutrisi semipadat. Sekelompok sel *E.coli* mengatur diri mereka untuk berkeliling yang membentuk sebuah lingkaran dengan bergerak naik ke gradien nutrisi ketika ditempatkan di tengah-tengah matriks semipadat dengan satu nutrisi *chemo-efefcter*. Sel-sel ketika dirangsang oleh suksinat tingkat tinggi, maka akan terbentuk sebuah *aspertate atraktan* yang membantu mereka untuk menggabungkan ke dalam kelompok dan dengan demikian dapat bergerak sebagai pola konsentris kawanan bakteri dengan kepadatan tinggi. Sel-sel-untuk signaling pada kawanan *E. coli* dapat diwakili oleh fungsi berikut.

$$J_{cc}\left(\theta, P(j,k,l)\right) = \sum_{i=1}^{s} J_{CC}\left(\theta, \theta^{i}(j,k,l)\right) =$$

$$\sum_{i=1}^{s}[-d_{attractant}\exp(-w_{attractant}\sum_{m=1}^{p}\left(\theta_m - \theta_m^i\right)^2)] +$$

$$\sum_{i=1}^{s}[h_{repellant}\exp(-w_{repellant}\sum_{m=1}^{p}(\theta_m - \theta_m^i)^2)] \quad (2\text{-}60)$$

Dengan $J_{CC}\left(\theta, P(j,k,l)\right)$ adalah nilai fungsi objektif tambahan untuk ditambahkan ke fungsi objektif yang sebenarnya(untuk diminimalkan) untuk menunjukkan waktu yang berbeda fungsi objektif, S adalah jumlah bakteri, p adalah jumlah variabel harus dioptimalkan yang hadir dalam setiap bakteri dan $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3 \ldots\ldots \theta_p]^T$ adalah titik p-dimensi cari domain.

$d_{attractant}, w_{attractant}, h_{repellant}, w_{repellant}$ adalah koefisien yang berbeda yang harus dipilih secara tepat.

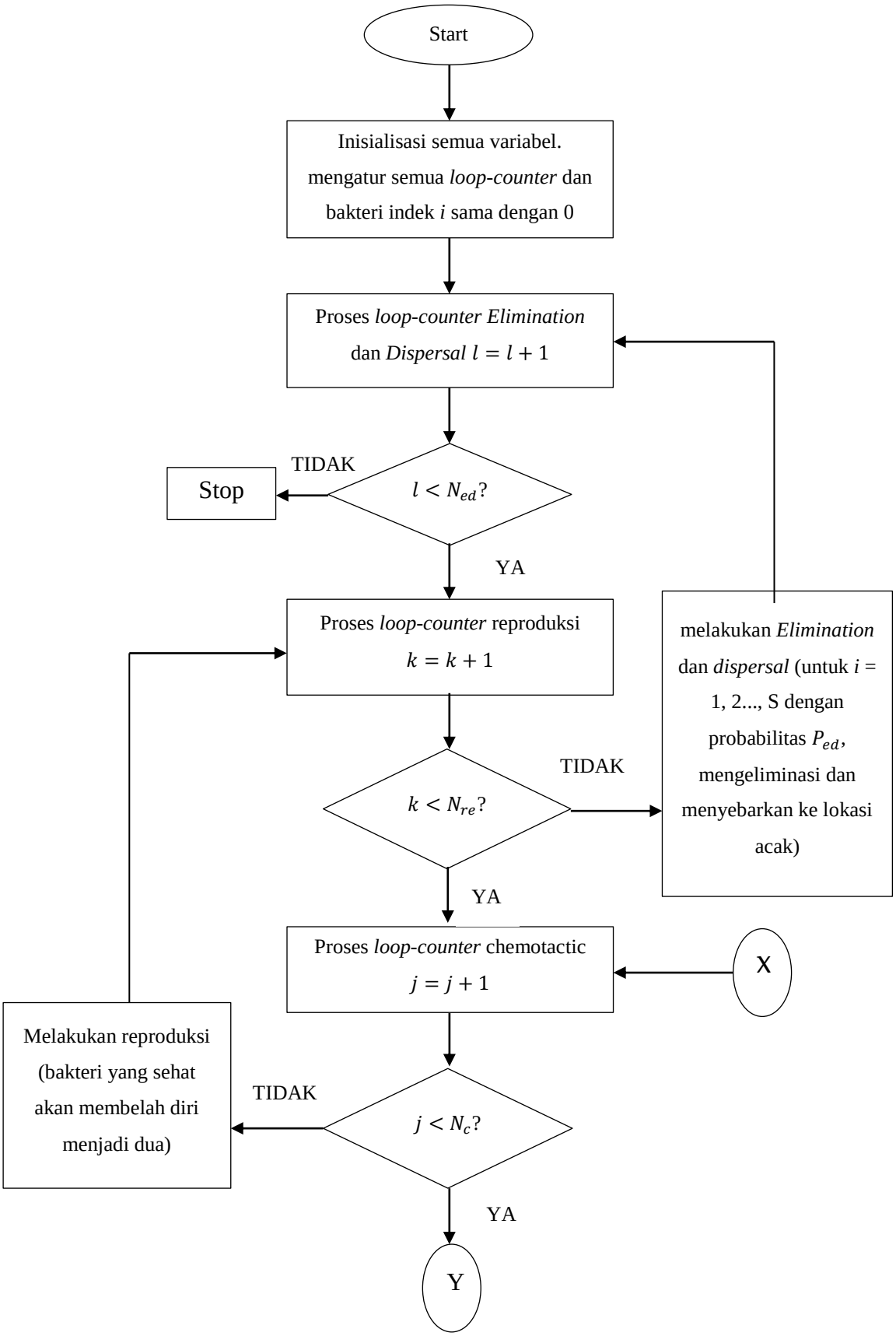
3. Reproduksi

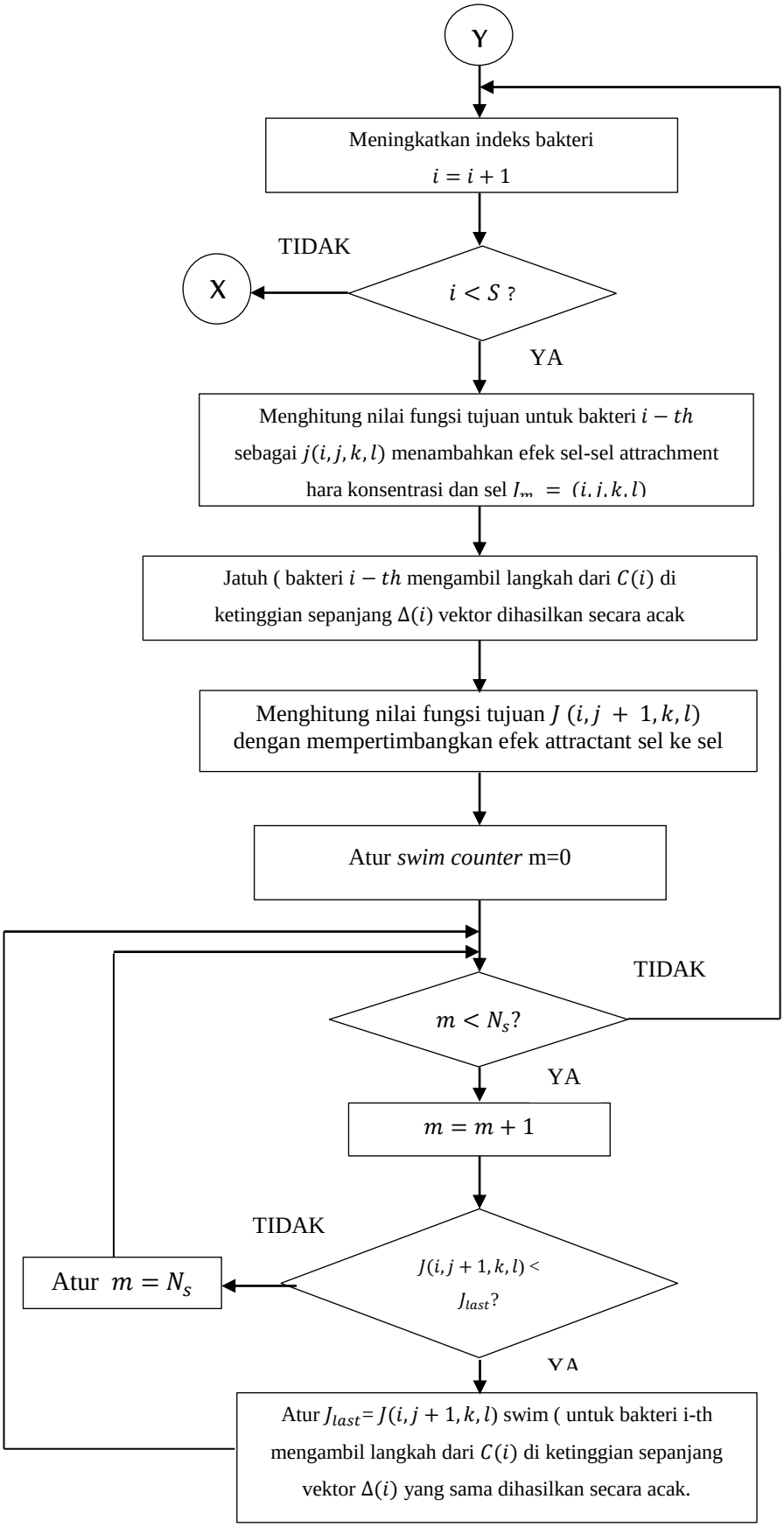
   Bakteri yang tidak sehat akhirnya mati, sementara setiap bakteri yang sehat (mereka unggul nilai fungsi objektif) membelah diri dibagi menjadi dua bakteri, yang kemudian ditempatkan di lokasi yang sama. Hal ini membuat ukuran kawanan konstan.

4. *Ellimination* dan *Dispersal*

   Perubahan bertahap atau secara tiba-tiba dalam lingkungan pada kehidupan bakteri dapat terjadi karena berbagai alasan. Hal tersebut dapat terjadi sehingga semua bakteri di suatu wilayah mati atau kelompok yang tersebar menjadi bagian dari lingkungan baru. Misalnya, kenaikan suhu lokal yang signifikan dapat membunuh sekelompok bakteri yang saat ini di wilayah dengan konsentrasi gradien gizi tinggi. Peristiwa dapat terjadi yang mana semua bakteri di suatu wilayah mati atau kelompok yang tersebar ke dalam lokasi baru. Selama jangka waktu yang lama, peristiwa tersebut telah menyebar berbagai jenis bakteri ke dalam setiap bagian dari lingkungan kita. Untuk mensimulasikan fenomena ini di BFO beberapa bakteri yang dilikuidasi secara acak dengan probabilitas yang sangat kecil sementara pengganti baru secara acak diinisialisasi atas ruang pencarian. peristiwa *Ellimination* dan *Dispersal* memiliki efek yang mungkin menghancurkan kemajuan *Chemotaxis*, tetapi mereka juga memiliki efek membantu dalam *Chemotaxis*, karena penyebaran dapat menempatkan bakteri di dekat sumber makanan yang baik. Dari perspektif yang luas, *Ellimination* dan *Dispersal* adalah bagian dari tingkat populasi jarak jauh perilaku motil (Senthilkumar,2012).

Pada Gambar 2.14 dan menunjukkan diagram alir program simulasi dengan metode BFO.





Gambar 2.15 Diagram Alir Program Simulasi BFO
Sumber : Dasgupta,dkk (2009)

Dari gambar diagram alir di atas, maka prosedur penerapan metode BFO pada permasalahan optimasi penempatan dan rating STATCOM ditunjukkan oleh langkah-langkah berikut ini :

Algoritma BFOA

Parameter :

Langkah 1 : inisialisasi parameter *S, Nc, Ns, Nre, Ned, Ped, C(i)(i=1,2…S),* θ^i

Algoritma :

Langkah 2 : loop *Ellimination* dan *Dispersal(Ned),* $l = l + 1$

Langkah 3 : loop reproduksi(Nre), $k = k + 1$

Langkah 4 : loop *chemotaxis(Nc),* $j = j + 1$

a. untuk i =1,2...S mengambil langkah *chemotactic* untuk bakteri i.

b. Menghitung fungsi *fitness* $J\ (i, j, k, l)$.

   Untuk $J\ (i, j, k, l) = J\ (i, j, k, l) + Jcc\ (\theta^i\ (j, k, l), P(j, k, l))$ tambahkan pada sel *attractant – repellant* untuk mensimulasikan perilaku mengerumuni.

c. Untuk $J_{last} = J\ (i, j, k, l)$ untuk menyimpan nilai ini karena kita mungkin menemukan biaya yang lebih baik.

d. Tumble : menghasilkan vektor acak $\Delta\ (i) \in \Re^p$ dengan setiap elemen $\Delta_m\ (i)$, m = 1,2,...p nomor acak pada [-1, 1].

e. Lalu, untuk $\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}}$ ini hasil dalam langkah ukuran C(i) ke arah *tumble* untuk bakteri *i.*

f. Hitung $J\ (i, j, k, l)$ dan untuk $J\ (i, j+1, k, l) = J\ (i, j, k, l) + Jcc\ (\theta^i\ (j+1, k, l), P(j+1, k, l))$.

g. Berenang (*Ns*).

(i) Untuk $m = 0$

(ii) Jika $m < N_s$

- Untuk $m = m+1$
- Jika $J(i, j+1, k, l) < J_{last}$ (jika dilakukan lebih baik) untuk $J_{last} = J(i, j+1, k, l)$ dan untuk $\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}}$, lalu gunakan $\theta^i(j+1, k, l)$

  untuk menghitung yang baru $J\ (i, j+1, k, l)$ seperti pada *f.*
- untuk $m = N_s$. Ini adalah akhir dari pernyataan

h. Melanjutkan ke bakteri selanjutnya (*i*+1) jika $i \neq S$ maka kembali ke [b] untuk proses bakteri selanjutnya.

Langkah 5: $Jika\ j < N_c$ lanjut ke langkah 4, kasus ini *chemotaxis* kontinyu karena hidup bakteri tidak akan berakhir.

Langkah 6: Reproduksi:

a. Jika diberikan k dan l , serta untuk i = 1,2,...S, maka

$J^i_{health} = \sum_{j=1}^{N_c+1} J(i,j,k,l)$

Untuk bateri i yang sehat (ukurannya adalah berapa banyak nutrisi yang didapat setelah waktu mencari makan selesai dan keberhasilan dalam menghindari zat yang berbahaya), yang demikian bakteri dan *chemotatic* memiliki parameter C(*i*) dalam urutan *ascending* nilai J_{health} (nilai lebih tinggi berarti memiliki kesehatan lebih rendah).

b. Bakteri S_r dengan nilai J_{health} tertinggi mati dan bakteri S_r tersisa dengan nilai-nilai *split* terbaik (proses ini dilakukan oleh salinan yang dibuat pada tempat yang sama seperti orang tua mereka).

Langkah 7: jika $k < N_{re}$, kembali ke langkah 3 dalam kasus ini, belum mencapai jumlah langkah-langkah tertentu pada reproduksi, jadi kita mulai proses loop *chemotactic*.

Langkah 8 :*Ellimination* dan *Dispersal* : untuk i=1,2,.....S dengan probabilitas P_{ed},dilakukan *Ellimination* dan *Dispersal* setiap bakteri (hal ini membuat jumlah bakteri dalam populasi konstan). Untuk melakukan hal ini, jika bakteri mati maka hanya akan membubarkan satu ke lokasi acak pada domain optimasi. Jika $l < N_{ed}$, lalu pergi ke langkah 2; Jika tidak maka berakhir.