

## **BAB 2**

### **Tinjauan Pustaka**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Penelitian yang dilakukan oleh Jeffrey, Reynaldo R (2016) yang berjudul “Analisa Pengaruh Koneksi Pembangkit Tersebar Pada Sistem Transmisi Dan Distribusi”. Penelitian ini membahas tentang pembangkit tersebar yang dipasang pada jaringan distribusi akan mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya. Sistem tenaga yang disimulasikan adalah sistem transmisi 14 bus dan distribusi 13 bus IEEE dengan OpenDSS. Simulasi menggunakan pembangkit tersebar berupa turbin angin, generator diesel, dan photovoltaic. Setelah pembangkit tersebar dihubungkan, pada sistem transmisi tidak mengalami perubahan yang besar[1].

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Jesuli (2021) yang berjudul “Pengaruh Pembangkit Tersebar Terhadap Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Sistem Distribusi Tenaga Listrik”. Penelitian ini membahas tentang pengaruh pembangkit tersebar terhadap tegangan dan rugi-rugi daya sistem distribusi tenaga listrik serta menyelidiki pengaruh lokasi penempatan pembangkit tersebar pada sistem distribusi tenaga listrik. Pada penelitian ini untuk mendapatkan besar tegangan setiap bus serta rugi-rugi daya sistem menggunakan perhitungan melalui program matlab[2].

Penelitian yang dilakukan oleh Rizki Tirta Nugraha (2014) yang berjudul “Analisis Rugi-rugi Daya Sistem Distribusi dengan Peningkatan Injeksi Jumlah Pembangkit Tersebar”. Penelitian ini membahas tentang melakukan studi penelitian di GI Turen di kota Malang, dengan menggunakan metode aliran daya Newton-Raphson dan pemodelan dilakukan dengan menggunakan software komputasi PSAT2.1.8 dengan 5 skenario percobaan. Hasil yang didapatkan diantara lain; dampak terhadap tegangan dari skenario yang diterapkan menunjukkan hasil terbaik pada skenario 5 yaitu level tegangan naik dari -10% menjadi -1% atau dari 0.90 p.u, menjadi 0.99 p.u, sedangkan dampak terhadap rugi-rugi daya skenario

2 menunjukkan hasil terbaiknya yaitu besar rugi-rugi daya menurun dari 0.040+j0.0078 MVA atau dari 4.37% menjadi 1.051% untuk daya aktif (P) dan dari 10.98% menjadi 1.98% untuk daya reaktif (Q)[3].

Penelitian yang dilakukan oleh Rudy Gianto (2019) yang berjudul “Model Ekuivalen-Pi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Generator Asinkron Untuk Analisis Aliran Daya”. Penelitian ini membahas operasi keadaan-tunak (*Steady State*) dari suatu sistem tenaga listrik biasanya ditentukan melalui analisis aliran daya. Penelitian ini mengusulkan metode sederhana untuk mengikutsertakan model pembangkit listrik tenaga angin (PLTAn) dengan generator asinkron pada perhitungan aliran daya[4].

## 2.2 Teori Aliran Daya Sistem Distribusi

Analisis aliran daya dapat didefinisikan sebagai perhitungan-perhitungan besar dan sudut fasa tegangan dari setiap bus yang ada pada sistem tenaga listrik untuk kondisi pembangkitan dan pembebanan tertentu. Setelah tegangan-tegangan bus ini dihitung, daya yang mengalir pada saluran transmisi serta rugi-rugi dayanya juga akan dapat ditentukan

Perumusan masalah aliran daya dapat diperoleh melalui persamaan yang menggambarkan penampilan dari jaringan sistem tenaga dalam bentuk admitansi. Persamaan ini kemudian digabungkan dengan rumusan injeksi daya bus sehingga menghasilkan [4]:

$$S_{Gi} - S_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Dimana:

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}: \text{pembangkitan daya pada bus } - i$$

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}: \text{pembebanan daya pada bus } - i$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i: \text{tegangan pada bus } - i$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}: \text{elemen } - ij \text{ dari matriks admitansi bus}$$

$$n = \text{jumlah bus sistem tenaga}$$

Tabel 2.1. Memperlihatkan variabel-variabel yang nilainya diketahui (ditentukan) dan yang tak diketahui (akan dihitung) pada persamaan (2.1). Beberapa catatan penting untuk variabel-variabel tersebut adalah sebagai berikut: (i) Oleh karena analisis aliran daya dilakukan pada kondisi beban tertentu,  $P_L$  dan  $Q_L$  diketahui nilainya; (ii) Matriks admitansi bus  $Y$  dihitung berdasarkan konfigurasi jaringan dan impedansi/admitansi saluran; (iii) Bus GI biasanya dianggap sebagai bus referensi, sehingga sudut tegangan pada bus ini adalah nol dan besar tegangannya dispesifikasi pada suatu nilai tertentu (misalnya 1,0 pu); (iv) Pada bus-bus beban,  $P_G$  dan  $Q_G$  adalah nol karena bus-bus ini tidak memiliki sumber pembangkit daya.

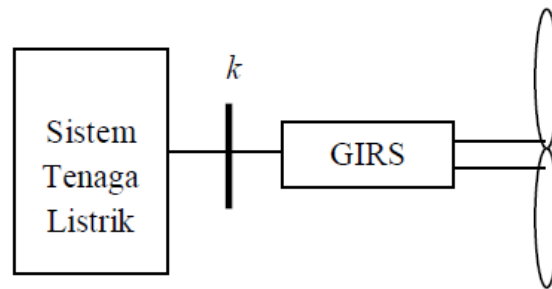
**Tabel 2.1.** Jenis Bus dan Variabel

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	Gardu Induk (GI)	$P_L, Q_L, Y,  V $ dan $\delta = 0$	$P_G$ dan $Q_G$
2	Beban (PQ)	$P_L, Q_L, Y,$ $P_G = Q_G = 0$	$ V $ dan $\delta$

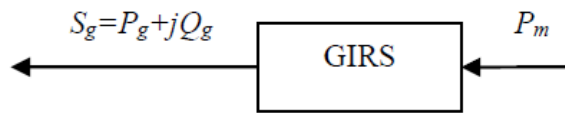
Agar persamaan (2.1) dapat diselesaikan, biasanya pada analisis aliran daya didefinisikan tiga jenis bus: bus referensi, bus pembangkit dan bus beban. Pendefinisian ini mengakibatkan jumlah persamaan menjadi sama dengan jumlah variabel yang akan dihitung, dan masalah aliran daya dapat dicari solusinya. Secara lengkap variable-variabel yang ditentukan nilainya dan yang akan dicari untuk setiap bus sistem tenaga diperlihatkan pada Tabel 2.1.

### 2.3 Model PLTAn Untuk Analisis Aliran Daya

Gambar 2.1(a) memperlihatkan PLTAn yang terhubung pada bus-k suatu sistem tenaga listrik. Konverter energi listrik dari PLTAn adalah generator induksi rotorsangkar (GIRS). Secara terpisah, GIRS tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.1(b) dengan input daya mekanik  $P_m$  dan output daya listrik  $S_g = P_g + jQ_g$ [4].

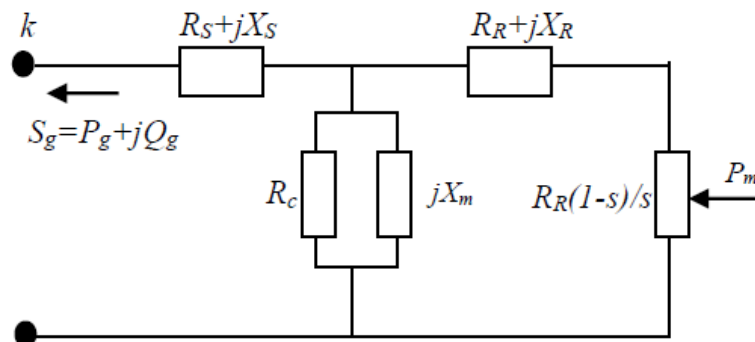


(a)



(b)

**Gambar 2.1.** PLTAn Terhubung Pada Sistem Tenaga



**Gambar 2.2.** Rangkaian Ekuivalen dari GIRS

Rangkaian ekivalen keadaan tunak dari GIRS ditunjukkan pada Gambar 2.2 dimana  $R_S$ ,  $X_S$ ,  $R_R$ ,  $X_R$ ,  $R_C$  dan  $X_m$  berturut-turut menyatakan resistansi stator, reaktansi bocor stator, resistansi rotor, reaktansi bocor rotor, resistansi rugi-rugi inti dan reaktansi magnetik. Resistansi  $R_R (1-s)/s$  merupakan resistansi dinamik dan nilainya tergantung pada slip  $s$ . Daya dari resistansi ini menggambarkan input daya mekanik  $P_m$  pada generator.

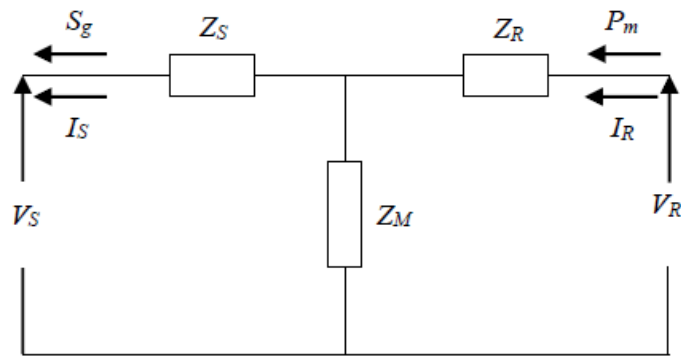
Perlu diingat bahwa  $P_m$  juga merupakan daya yang dikirim oleh turbin angin ke generator induksi. Daya ini nilainya diketahui karena pabrik pembuat turbin biasanya menyediakan nilai-nilai untuk  $P_m$  sebagai fungsi dari kecepatan angin.

Gambar 2.3(a) memperlihatkan rangkaian ekivalen GIRS dalam bentuk impedansi. Impedansi-impedansi  $Z_S$ ,  $Z_R$  dan  $Z_M$  pada Gambar 2.3(a) diberikan oleh:

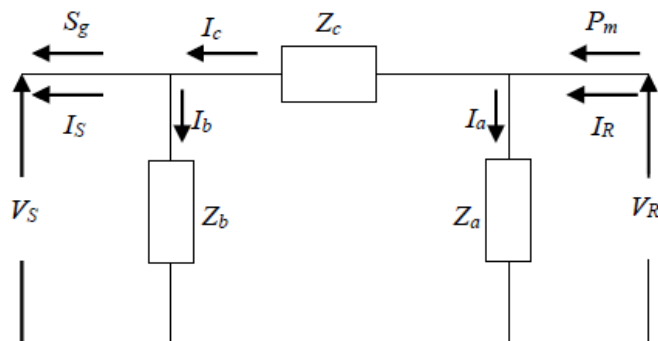
$$\begin{aligned} Z_S &= R_S + jX_S \\ Z_R &= R_R + jX_R \\ Z_M &= jR_C X_M / (R_C + jX_m) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.2)$$

Sedangkan rangkaian pada Gambar 2.3(b) diperoleh dengan menerapkan transformasi Y-D pada rangkaian Gambar 2.3(a). Transformasi ini dilakukan untuk mempermudah penurunan model matematis dari PLTAn. Berdasarkan teori dasar rangkaian listrik, dapat ditunjukkan bahwa impedansi-impedansi  $Z_a$ ,  $Z_b$  dan  $Z_c$  pada Gambar 2.3(b) diberikan oleh:

$$\begin{aligned} Z_a &= Z_R + Z_M + Z_R Z_M / Z_S \\ Z_b &= Z_S + Z_M + Z_S Z_M / Z_R \\ Z_c &= Z_S + Z_R + Z_S Z_R / Z_M \end{aligned} \dots\dots\dots(2.3)$$



(a)



(b)

**Gambar 2.3.** Rangkaian Ekuivalen dari GIRS dalam Bentuk Impedansi

Berdasarkan Gambar 2.3(b), keluaran daya listrik PLTAn adalah:

$$S_g = V_S I_S^* \dots \dots \dots (2.4)$$

Dan masukan daya mekanik turbin angin diberikan oleh:

$$S_m = V_R I_R^* \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana  $I_S$  dan  $I_R$  berturut-turut adalah arus-arus stator dan rotor. Dengan mengamati Gambar 2.3(b), arus-arus stator dan rotor ini dapat dihitung melalui:

$$I_S = I_c - I_b \dots \dots \dots (2.6)$$

$$I_S = I_c - I_b \dots \dots \dots (2.7)$$

Oleh karena:

$$I_a = \frac{V_R}{Z_a} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$I_b = \frac{V_S}{Z_b} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I_c = \frac{V_R - V_S}{Z_c} \dots\dots\dots(2.10)$$

Maka, arus-arus stator dan rotor menjadi:

$$I_S = \frac{1}{Z_c} V_R - \left( \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} \right) V_S \dots\dots\dots(2.11)$$

$$I_R = \left( \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_c} \right) V_R - \frac{1}{Z_c} V_S \dots\dots\dots(2.12)$$

Substitusi (2.11) pada (2.4) dan (2.12) pada (2.5), untuk keluaran daya PLTAn ( $S_g = P_g + jQ_g$ ). dan masukan daya mekanik ( $S_m = P_m + j0$ ) menjadi:

$$S_g = \frac{1}{Z_c^*} V_R^* V_S - \left( \frac{1}{Z_c^*} + \frac{1}{Z_b^*} \right) V_S^* V_S \dots\dots\dots(2.13)$$

$$S_m = \left( \frac{1}{Z_c^*} + \frac{1}{Z_a^*} \right) V_R^* V_R - \frac{1}{Z_c^*} V_S^* V_R \dots\dots\dots(2.14)$$

Dengan mengatur kembali persamaan (2.13) dan (2.14), akan diperoleh:

$$S_g - \frac{1}{Z_c^*} V_R^* V_S + \left( \frac{1}{Z_c^*} + \frac{1}{Z_b^*} \right) V_S^* V_S = 0 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$S_m - \left( \frac{1}{Z_c^*} + \frac{1}{Z_a^*} \right) V_R^* V_R + \frac{1}{Z_c^*} V_S^* V_R = 0 \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk sistem tenaga listrik yang mengandung PLTAn, solusi masalah aliran dayanya dapat dicari dengan menyelesaikan secara simultan persamaan-persamaan nonlinear (2.1), (2.15) dan (2.16). Perlu dicatat bahwa  $V_S$  pada persamaan (2.15) dan (2.16) merupakan tegangan stator dari GIRS (atau sama dengan tegangan pada bus PLTAn). Sedangkan  $V_R = |V_R| \angle \alpha$  adalah tegangan rotor GIRS.

Dengan demikian, persamaan (2.15) dan (2.16) adalah persamaan tambahan pada rumusan masalah aliran (2.1). Persamaan ini muncul sebagai akibat adanya integrasi PLTAn pada sistem. Sedangkan variabel tambahan yang harus dicari solusinya adalah daya yang dibangkitkan oleh PLTAn ( $S_g$ ) dan tegangan rotor ( $V_R$ ). Secara lengkap, variabel-variabel yang ada pada setiap bus untuk sistem tenaga yang mengandung PLTAn diperlihatkan pada Tabel 2.2. Terlihat bahwa untuk bus PLTAn,  $P_G = P_g$ ,  $Q_G = Q_g$ ,  $|V| = |V_S|$ ,  $\delta = \delta_S$ ,  $|V_R|$ , dan  $\alpha$ .

**Tabel 2.2.** Jenis Bus & Sistem dengan PLTAn

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	Gardu Induk (GI)	$P_L, Q_L, Y,  V $ dan $\delta = 0$	$P_G$ dan $Q_G$
2	Beban	$P_L, Q_L, Y$ $P_G = Q_G = 0$	$ V $ dan $\delta$
3	PLTAn	$P_L, Q_L, Y$	$P_G, Q_G,  V , \delta,  V_R , \text{ dan } \alpha$

Sumber diambil dari Referensi[4]

#### 2.4 Solusi Aliran Daya dengan Metoda Newton-Raphson

Pada Persamaan (2.1) merupakan seset persamaan nonlinier dengan jumlah persamaan  $2n$  dimana  $n$  adalah jumlah bus dalam sistem tenaga. Metoda Newton-Raphson adalah metoda yang paling sering digunakan untuk menyelesaikan suatu sistem persamaan nonlinier dan dapat menyelesaikan perhitungan daya waktu komputasi yang lebih cepat dibandingkan dengan waktu komputasi pada metoda lain. Dalam mencari solusi, metoda Newton Raphson menggunakan teknik iteratif. Dengan teknik iteratif ini, pencarian solusi dimulai dengan estimasi awal untuk variabel yang ingin dicari. Estimasi tersebut kemudian diperbaiki secara berurutan sampai solusi yang diinginkan diperoleh. Apabila solusinya telah



didapat, maka dikatakan bahwa solusinya telah konvergen. Berikut adalah penjelasan mengenai penggunaan metoda tersebut pada sistem persamaan nonlinier umum. Misalkan seset persamaan nonlinier dengan jumlah persamaan  $n$  diberikan oleh:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \dots\dots\dots(2.17)$$

dimana  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  adalah variabel yang akan dicari.

Langkah iteratif dari metoda Newton Raphson dalam mencari solusi adalah dengan menyelesaikan persamaan berikut secara berurutan:

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta\mathbf{X}^{(k)} \dots\dots\dots(2.18)$$

dimana:

$$\Delta\mathbf{X}^{(k)} = -[\mathbf{J}(\mathbf{X}^{(k)})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}^{(k)}) \dots\dots\dots(2.19)$$

Pada persamaan (2.19),  $\mathbf{J}(\mathbf{X})$  merupakan jacobian dari  $\mathbf{F}(\mathbf{X})$  dan dihitung melalui:

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan demikian, Langkah-langkah dari metoda Newton-Raphson dalam mencari solusi adalah sesuai algoritma berikut:

- Langkah 1: Set  $k = 0$ , dan tentukan estimasi awal untuk solusi  $\mathbf{X}^{(k)}$  dan toleransi  $\epsilon$ .
- Langkah 2: Cek apakah maks  $|\mathbf{F}(\mathbf{X}^{(k)})| < \epsilon$ , jika iya, stop dan solusinya adalah  $(\mathbf{X}^{(k)})$  jika tidak, lanjutkan ke Langkah 3.
- Langkah 3: Hitung jacobian  $\mathbf{J}(\mathbf{X}^{(k)})$  dan  $\Delta\mathbf{X}^{(k)}$  melalui (2.19).

Langkah 4: Hitung  $\mathbf{X}^{(k+1)}$  atau perbaiki nilai estimasi melalui (2.18)

Langkah 5: Set  $k = k + 1$ , dan kembali ke langkah 2.

Matriks Jacobian (2.20) dapat dihitung secara analitik ataupun numerik. Namun demikian, metode numerik lebih sering digunakan karena lebih mudah dan efisien, Berikut adalah formulasi untuk menghitung  $\mathbf{J}(\mathbf{X})$  pada titik  $\mathbf{X}^*$ :

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.21)$$

Elemen-elemen dari  $\mathbf{J}(\mathbf{X}^*)$  dihitung melalui rumus-rumus berikut:

Baris pertama:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} f_1(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_1(x_1^*+h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_1(x_1^*-h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f_1(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_1(x_1^*, x_2^*+h, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_1(x_1^*, x_2^*-h, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} f_1(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_1(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*+h) - f_1(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*-h)}{2h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.22)$$

Baris kedua:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} f_2(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_2(x_1^*+h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_2(x_1^*-h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f_2(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_2(x_1^*, x_2^*+h, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_2(x_1^*, x_2^*-h, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} f_2(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_2(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*+h) - f_2(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*-h)}{2h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.23)$$

Baris ke-n:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} f_n(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_n(x_1^*+h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_n(x_1^*-h, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f_n(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_n(x_1^*, x_2^*+h, x_3^*, \dots, x_n^*) - f_n(x_1^*, x_2^*-h, x_3^*, \dots, x_n^*)}{2h} \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} f_n(\mathbf{X}^*) &\approx \frac{f_n(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*+h) - f_n(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*-h)}{2h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.24)$$

Pada formula-formula diatas, h merupakan konstanta dengan nilai numerik yang cukup kecil (misalkan: 0.01; 0.001; atau 0.0001).

## 2.5 Perhitungan Rugi-Rugi Daya Saluran

Bila dimisalkan bahwa saluran yang menghubungkan bus  $p$  dan  $q$  memiliki admitansi seri  $y_{pq}$  dan admitansi shunt total  $y'_{pq}$ , maka arus yang mengalir pada saluran tersebut akan diberikan oleh:

$$I_{pq} = (V_p - V_q)y_{pq} + V_p \frac{y'_{pq}}{2} \dots\dots\dots(2.25)$$

Sehingga, aliran daya dari bus  $p$  dan  $q$  diberikan oleh:

$$P_{pq} + jQ_{pq} = V_p I_{pq}^* = V_p [(V_p - V_q)^* y_{pq}^* + V_p^* \frac{y'_{pq}}{2}] \dots\dots\dots(2.26)$$

Dengan cara yang sama, aliran daya dari bus  $q$  dan  $p$  diberikan oleh:

$$P_{qp} + jQ_{qp} = V_q I_{qp}^* = V_q [(V_q - V_p)^* y_{qp}^* + V_q^* \frac{y'_{qp}}{2}] \dots\dots\dots(2.27)$$

Rugi-rugi daya pada saluran  $p$ - $q$  dapat dihitung dengan menjumlahkan  $P_{pq} + jQ_{pq}$  dan  $P_{qp} + jQ_{qp}$ .