

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

“Susanto, Sarjiya, & Hadi” Algoritma Aliran Daya dengan Metode Bacward/Forward Sweep pada sistem Distribusi Radial” Menyatakan bahwa pada sistem distribusi radial dengan aliran daya yang lebih kompleks, adanya perbedaan karakteristik dari jaringan distribusi seperti striktur radial, nilai node yang besar dan nilai rasio R/X yang tinggi, maka digunakan metode bacward/forward sweep yang komputasinya efektif disetiap iterasi serta solusi dan perhitungan numeriknya tepat. [2]

“Zakwansyah, Sara, Lubis, & Amri” OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR PADA PENYULANG KOTA CALANG DENGAN METODE MODIFIED BACKWARD-FORWARD SWEEP”; Menyatakan untuk mengatasi rugi- rugi dan susut tegangan di saluran adalah dengan menambahkan kapasitas trafo distribusi, mensinkronkan sistem distribusi dengan distributed generated (DG). Selain metode diatas rugi-rugi saluran dan mengurangi susut tegangan pada saluran juga bisa dilakukan dengan pemasangan kapasitor secara paralel, letak pemasangan yang tepat serta kapasitas kapasitor berdasarkan faktor daya saluran. [4]

” Tharo, Tarigan, Anisah, & Yuda” Penggunaan Kapasitor Bank Sebagai Solusi Drop Tegangan Pada Jaringan 20 KV” Menyatakan bahwa drop tegangan adalah selisih tegangan pada sisi kirim dengan tegangan pada sisi penerima. Sesuai

SPLN 1 : 1995, toleransi tegangan pelayanan adalah +5% dari tegangan normal atau standar tegangan rendah pada sisi pangkal dan -10% pada sisi ujung. [5]

“Bandri & Danial” Studi Analisa Pemasangan Kapasitor Pada Jaringan Udara Tegangan Menengah 20 KV Terhadap drop Tegangan (Aplikasi Pada Feeder 7 Pinang GI Muaro Bungo)” Menyatakan untuk mengurangi beban daya reaktif induktif diperlukan sumber daya reaktif kapasitif, salah satu caranya adalah dengan penambahan kapasitor yang dipasang secara paralel pada penghantar penyulang jaringan tegangan menengah 20 KV yang akan menyebabkan arus yang mengalir pada penghantar menjadi lebih kecil sehingga dapat mengurangi besarnya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada penyulang. [6]

“Alland & Arfah Z” Perancangan Kebutuhan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya pada Line Mess I di PT. Bumi Lamongan Sejati (WBL)” Menyatakan bahwa sebuah kapasitor sebagai suatu alat yang memberikan arus yang ketinggalan (lagging) dan bukannya sebagai alat yang memberi arus yang mendahului (leading), jadi sebuah kapsitor variable yang terpasang paralel pada suatu beban induktif dapat di atur sedemikian rupa sehingga arus yang mendahului pada kapasitor menjadi tepat sama besar dengan komponen arus pada beban induktif tertinggal 90° terhadap tegangan. [7]

2.2 Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang bertugas mengirim energi listrik dari pembangkit listrik sampai ke konsumen. Termasuk didalamnya mulai dari jaringan tegangan menengah 20 kV dan jaringan tegangan

rendah 380/220 V hingga ke pelanggan. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) atau jaringan distribusi primer dan Jaringan Tegangan Rendah atau jaringan distribusi sekunder. Pendistribusian umumnya dilakukan melalui saluran udara dan bawah tanah. [8]

Berdasarkan pengawatannya, sistem distribusi tegangan menengah (JTM) dibagi menjadi dua, yaitu:

1. 20 KV 3 phase 3 kawat dengan pentanahan netral tinggi dan 20 KV dengan pentanahan netral rendah.
2. 20 KV 3 phase 4 kawat dengan netral pentanahan langsung.

Pada elemen-elemen jaringan distribusi pada lokasi-lokasi tertentu akan dipasang trafo-trafo, yang difungsikan untuk menurunkan tegangan distribusi 20 kV menjadi 380/220 Volt. Dari trafo distribusi selanjutnya disalurkan menuju ke pelanggan dengan kabel-kabel tegangan rendah yang menjalar di sepanjang pusat pemukiman dari pelanggan komersial maupun industri pada lokasi tersebut. [8]

2.3 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer dimulai dari sisi sekunder trafo daya pada gardu induk sampai ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran. Pada distribusi primer terdapat 5 pola konfigurasi jaringan yaitu sistem radial, sistem loop, sistem spindel, sistem spot network dan sistem interkoneksi. [8]

2.3.1 Sistem Radial

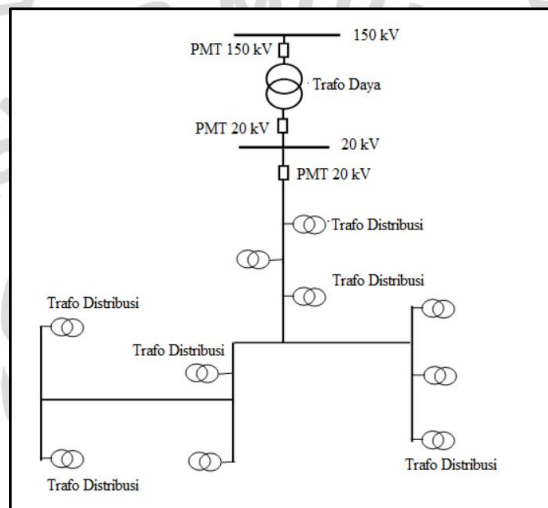
Pada sistem ini saluran ditarik secara radial dari suatu titik sumber jaringan, kemudian dicabang-cabangkan menuju titik-titik beban yang di

layani. Sistem ini terdiri dari fider (feeders) atau penyulang yang menyuplai gardu-gardu distribusi secara radial. Konfigurasi sistem radial dibagi menjadi 2 bagian yaitu:

1. Sistem Radial Terbuka

Pada sistem ini ketika terjadi gangguan pendistribusian tenaga listrik akan terhenti cukup lama sampai gangguan dapat teratasi.

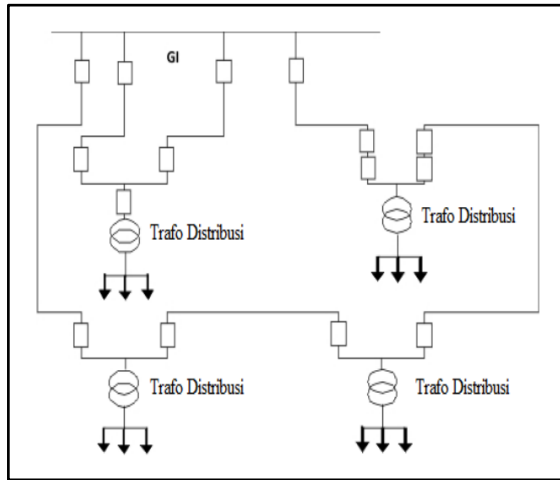
[8]



Gambar 2. 1 Sistem Radial Terbuka

2. Sistem Radial Paralel

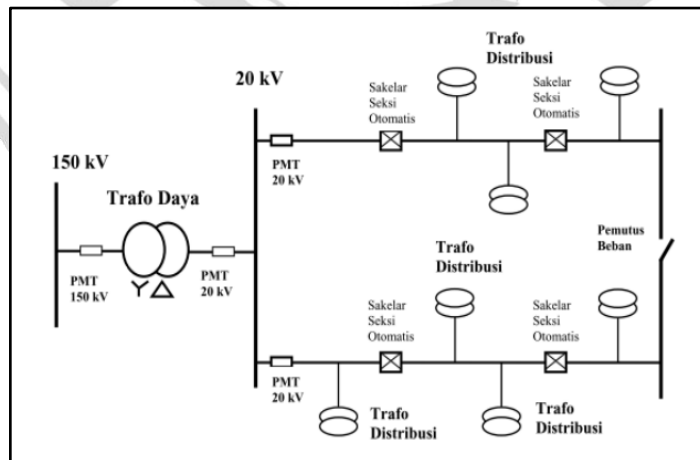
Pada sistem ini beban dilayani oleh dua saluran, sehingga apabila salah satu saluran mengalami gangguan, maka saluran yang satu lagi dapat mengcover, sehingga pemadaman tak perlu terjadi. [8]



Gambar 2. 2 Sistem Radial Paralel

2.3.2 Sistem Loop

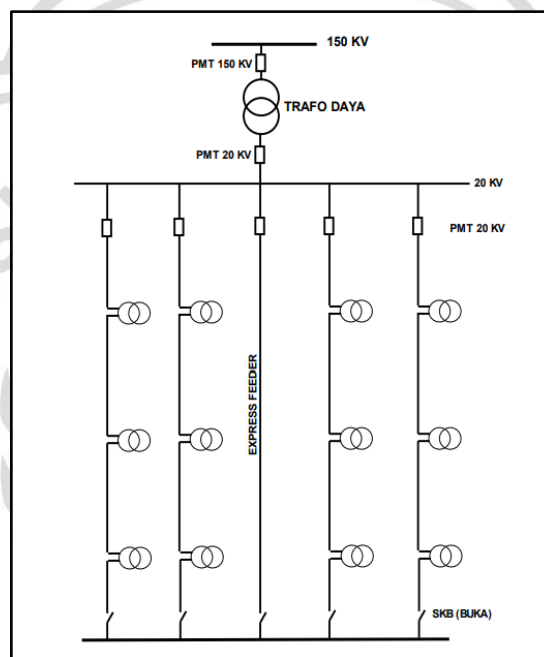
Rangkaian saluran disusun membentuk lingkaran untuk melayani titik beban dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin dan kualitas dayanya menjadi lebih baik. Bentuk dari jaringan distribusi sistem loop ini dibagi menjadi 2 macam yaitu: bentuk Open Loop dan bentuk Close Loop. [8]



Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan Sistem Loop

2.3.3 Sistem Spindel

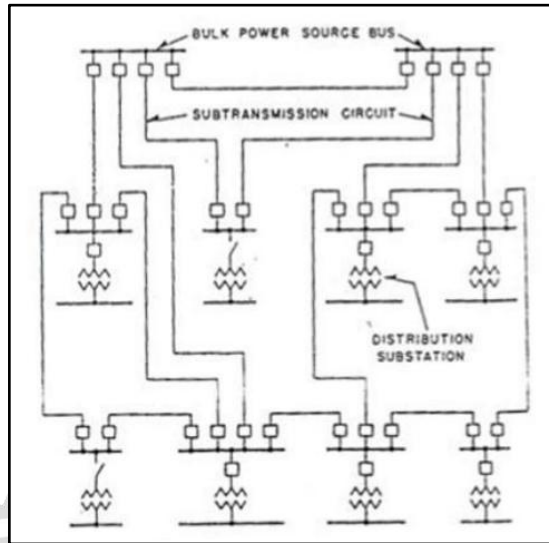
Sistem spindel adalah saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang cocok diterapkan di kota-kota besar. Sistem spindel normalnya terdiri dari maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. [8]



Gambar 2. 4 Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel

2.3.4 Sistem Spot Network

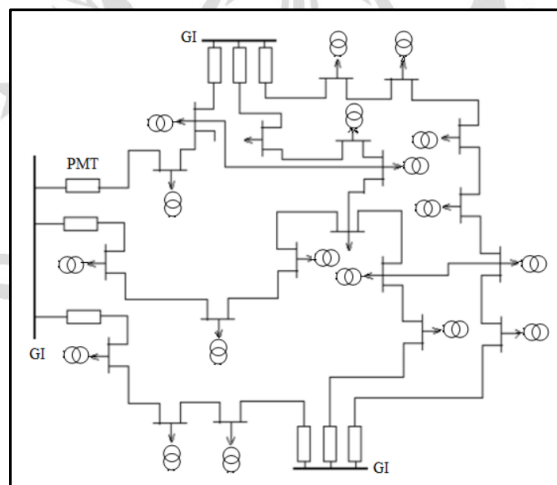
Sistem ini adalah hasil dari pengembangan sistem-sistem terdahulu dan merupakan sistem yang paling baik, karena sistem ini dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik. Selain itu jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik feeder. [8]



Gambar 2. 5 Konfigurasi Jaringan Sistem Spot Network

2.3.5 Sistem Interkoneksi

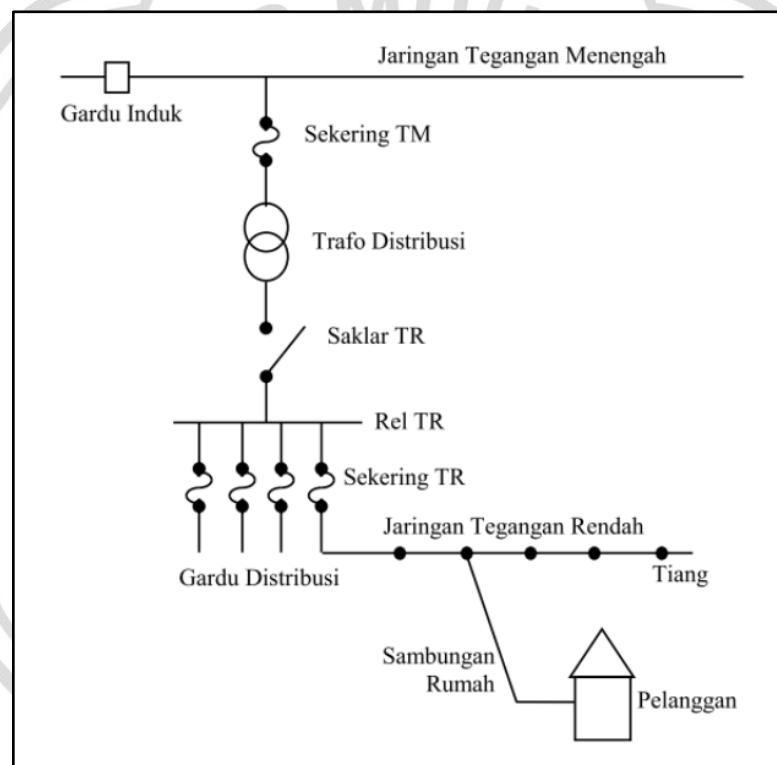
Sistem ini mengalirkan tenaga listrik dari beberapa pembangkit tenaga listrik yang diatur bekerja secara paralel. Sehingga penyaluran tenaga listrik berlangsung terus menerus (tanpa terputus). [8]



Gambar 2. 6 Konfigurasi Jaringan Sitem Interkoneksi

2.4 Jaringan Distribusi Sekunder

Distribusi sekunder adalah system distribusi pada tegangan rendah (380/220 Volt) Jaringan distribusi sekunder dimula dari sisi sekunder trafo distribusi dan berakhir hingga ke alat ukur (meteran) pelanggan. Pendistribusian dilakukan menggunakan kawat berisolasi. Karena sistem ini merupakan bagian yang berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik sudah selayaknya diperhatikan. [8]



Gambar 2. 7 Jaringan Distribusi Sekunder

2.5 Analisa Aliran Daya

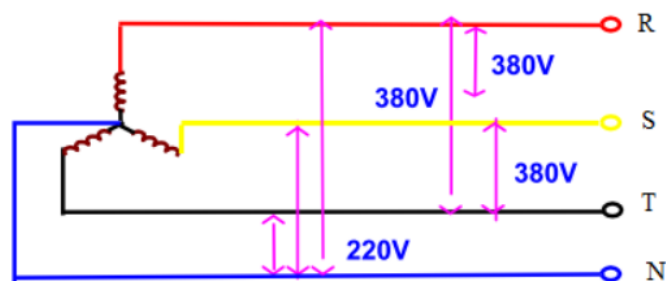
Analisa aliran daya ialah analisa yang di dalamnya berisi perhitungan tegangan, daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari sistem pembangkit melalui

saluran distribusi sampai pada beban. Besarnya daya yang mengalir tergantung pada besarnya beban yang terdapat pada bus. Manfaat yang didapat yaitu untuk mengetahui nilai daya dalam sistem tenaga listrik apakah masih memenuhi batas-batas yang telah ditentukan, mengetahui besar Losses, dan untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem baru. [9]

2.5.1 Tegangan

Tegangan pada jaringan distribusi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu tegangan menengah (TM) dan tegangan rendah (TR). Tegangan menengah berada pada rentang 1 kV sampai dengan 30 kV, dan untuk negara Indonesia sendiri menggunakan tegangan 20 kV tegangan antar fase-fase. Tegangan menengah disalurkan (energi listrik) dari gardu induk (GI) menuju gardu-gardu distribusi ataupun langsung menuju pelanggan tegangan menengah (industri). [8]

Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V dimana tegangan 380 V merupakan besar tegangan antar fase dan tegangan 220 V yang merupakan tegangan fase-netral.



Gambar 2. 8 Sistem Distribusi Tiga Phase Empat Kawat

Rumus tegangan 3 phase:

$$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

V_P = tegangan fasa - netral (R-N atau S-N atau T-N)

V_L = tegangan fasa - fasa (R-S atau S-T atau R-T)

2.5.2 Daya

Daya listrik ialah besarnya laju hantaran listrik pada suatu rangkaian listrik. Satuan internasionalnya adalah **W** (*Watt*) dan yang menyatakan besarnya usaha sumber tegangan untuk mengalirkan arus listrik tiap satuan waktu adalah **J/s** (*Joule/detik*).

Berikut adalah rumus untuk mengukur daya listrik:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

P = Daya (W)

W = Usaha (J)

t = Waktu (s)

2.5.2.1 Daya Aktif

Daya aktif ialah daya sesungguhnya yang dibutuhkan oleh beban, dengan kata lain adalah daya yang terpakai atau terserap. Daya

aktif ini adalah daya yang tercatat pada KWH meter dengan satuan Watt (W). [10]

Persamaan daya aktif :

Persamaan daya aktif satu phasa

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \dots\dots\dots(2.3)$$

Persamaan daya aktif tiga phasa

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\cos \theta$ = Faktor daya

$\sqrt{3}$ = 3 fasa

2.5.2.2 Daya Reaktif

Daya reaktif ialah daya yang dibutuhkan untuk membentuk medan magnet atau daya yang timbul dari beban yang bersifat induktif. Daya ini adalah daya rugi-rugi yang tidak diinginkan dan semaksimal mungkin harus dihindari. Bersumber dari komponen reaktif dengan satuan VAR. [10]

Persamaan daya reaktif :

Persamaan daya reaktif satu phasa

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2.5)$$

Persamaan daya reaktif tiga phasa

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\sin \varphi$ = Sudut fasa

$\sqrt{3}$ = 3 fasa

2.5.2.3 Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang sebenarnya dihasilkan oleh generator dan diberikan PLN kepada konsumen, dengan satuan VA (*Volt Ampere*). [10]

Persamaan daya semu :

$$S = V \cdot I \dots\dots\dots(2.7)$$

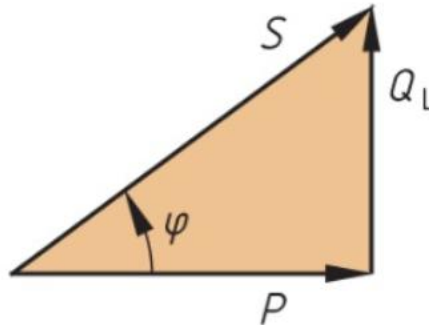
Keterangan :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.5.2.4 Segitiga Daya



Gambar 2. 9 Segitiga Daya

Daya aktif (**P**) digambarkan dengan garis lurus horizontal. Daya reaktif (**Q**) berbeda sudut 90° dari daya aktif. Dan daya semu (**S**) adalah hasil penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif secara vektor. Berikut adalah rumus segitiga daya :

$P^2 = S^2 - Q^2$	$Q^2 = S^2 - P^2$	$S^2 = P^2 + Q^2$
$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
<small>1. Daya Aktif</small>	<small>2. Daya Reaktif</small>	<small>3. Daya Semu</small>

(2.8)

Keterangan :

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAR)

S = Daya semu (VA)

2.6 Penyusutan Energi Pada Jaringan Distribusi

Ketika pendistribusian energi listrik dari sumber menuju konsumen dengan jarak yang jauh dapat menimbulkan rugi-rugi daya yang cukup besar, ini diperoleh

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

X	= Reaktansi	Ω/km
f	= Frekuensi	Hz
L	= Induktansi	mH/km

Jatuh tegangan relatif atau regulasi tegangan dinyatakan dengan rumus:

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

V_s = Tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = Tegangan pada ujung penerimaan

Pada jarak dekat jatuh tegangan tidak berarti, tetapi untuk jarak sedang-jauh dapat mencapai 5-15%. Sedangkan berdasarkan SPLN 72 : 1987 pada jaringan menengah kriteria jatuh tegangan maksimal adalah 5%. [11]

2.6.2 Rugi-rugi Daya

Rugi-rugi daya yang besar terjadi ketika proses penyaluran, karena luasnya daerah yang membutuhkan suplai tenaga listrik dari jaringan distribusi.

Rugi-rugi pada jaringan distribusi ada 2 yaitu:

1. Rugi-rugi daya aktif

Yaitu rugi-rugi yang ditentukan dari kuadrat arus (I^2) dan resistansi jaringan (R) yang mereperentasikan jarak saluran. Yang

mempengaruhi rugi-rugi daya aktif adalah besarnya arus dan besarnya resistansi jaringan.

Rumus rugi-rugi daya aktif per phasa:

$$P_{rugi-rugi(1\phi)} = I^2 \cdot R \text{ (Watt)(2.12)}$$

Sedangkan rumus rugi-rugi daya aktif tiga phase:

$$P_{rugi-rugi(3\phi)} = 3 \cdot I^2 \cdot R \text{ (Watt)(2.13)}$$

$$= 3 \cdot P_{1\phi} \text{(2.14)}$$

Keterangan :

I = Arus pada jaringan (A)

R = Hamabatan dalam penghantar (ohm)

2. Rugi-rugi daya reaktif

Yaitu rugi-rugi yang ditentukan dari kuadrat arus (I^2) dan reaktansi jaringan (X) yang mereperentasikan jarak saluran.

Rumus rugi-rugi daya reaktif per phasa:

$$Q_{rugi-rugi(1\phi)} = I^2 \cdot X \text{ (Var)(2.15)}$$

Sedangkan rumus rugi-rugi daya reaktif tiga phase:

$$Q_{rugi-rugi(3\phi)} = 3 \cdot I^2 \cdot X \text{ (Var)(2.16)}$$

$$= 3 \cdot Q_{1\phi} \text{(2.17)}$$

Keterangan :

I = Arus pada jaringan (A)

X = Hamabatan reaktansi dalam penghantar (ohm)

2.7 Effisiensi

Perbandingan antara besarnya daya listrik keluaran dengan daya listrik yang masuk pada saluran distribusi disebut efisiensi. Rumus untuk menghitung efisiensi yaitu :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

$$P_{in} = P_{rugi-rugi} + P_{out} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

P_{in} = Daya yang masuk

P_{out} = Daya yang keluar

$P_{rugi-rugi}$ = Rugi-rugi daya pada saluran

2.8 Metode Backward-Forward

Analisa aliran daya yang bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan pada setiap bus, aliran daya dan daya pada sistem transmisi maupun distribusi biasanya dilakukan dengan menggunakan metode *gauss siedel*, *newton raphson*, dan *fast decoupled*. Namun ketiga metode diatas mempunyai kekurangan apabila diterapkan pada sistem distribusi radial yang mempunyai perbandingan R/X tinggi, oleh karena itu metode *backward-forward* dipilih dimana analisa aliran daya pada sistem distribusi bisa diselesaikan tanpa banyak perhitungan dan efisien pada setiap iterasi.

[4]

Metode *backward-forward* dalam analisa aliran daya jaringan distribusi radial akan digambarkan seperti sebuah pohon dengan bus pertama sebagai akar (slack bus) dan bus lainnya sebagai cabang (bus beban). [12]

Untuk menghitung arus pada metode *backward-forward* menggunakan prinsip hukum Kirchoff. Langkah kerja metode *backward-forward* yang pertama adalah menghitung besar arus yang mengalir pada saluran dari bus awal hingga akhir (backward), langkah kedua yaitu menghitung nilai drop tegangan pada setiap saluran dengan mengalikan nilai arus yang telah dihitung sebelumnya dengan nilai impedansi salurannya (forward). [12]

Persamaan-persamaan dalam metode *backward-forward* :

1. Menghitung arus yang mengalir pada saluran dari bus awal hingga akhir dengan persamaan :

$$I_{Idi} = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right] \dots\dots\dots (2.20)$$

Keterangan :

- I_{Idi} = Arus beban pada titik i
- P_i = Kebutuhan daya aktif pada titik i
- Q_i = Kebutuhan daya reaktif pada titik i
- V_i = Tegangan pada titik i

2. Menghitung tegangan pada masing-masing bus dengan persamaan :

$$V_i = V_{Ui} - Z_i \cdot I_{Li} \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan :

- V_i = Tegangan pada titik i

V_{Ui} = Tegangan pada atas dari titik i

Z_i = Impedansi saluran i

I_{Li} = Arus yang mengalir pada saluran i

3. Membentuk matriks BIBC (Bus Injection to Branch Current) :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$[B] = [BIBC][1] \dots\dots\dots (2.23)$$

4. Membentuk matriks BCBV (Branch Current to Branch Voltage) :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \\ V_1 - V_7 \\ V_1 - V_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{56} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{56} & Z_{67} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{56} & Z_{67} & Z_{78} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \dots\dots\dots (2.25)$$

5. Menghitung tegangan jatuh (*drop voltage*) :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][1] \dots\dots\dots (2.26)$$

$$[\Delta V] = [DLF][1] \dots\dots\dots (2.27)$$

6. Menghitung tegangan :

$$[V_i] = V_1 - [\Delta V] \dots\dots\dots (2.28)$$

7. Menghitung rugi-rugi daya :

$$S_{L\phi} = S_\phi + S_\phi \dots\dots\dots (2.29)$$

$$P_{L\phi} = S_{L\phi} + \text{Cos}\phi \dots\dots\dots (2.30)$$

2.9 Kapasitor Bank

Pemasangan kapasitor berdasarkan nilai faktor daya beban, daya reaktif yang didapat dari kapasitor berdasarkan nilai daya reaktif awal terhadap nilai daya reaktif baru. [4] Daya reaktif yang diperlukan kapasitor dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q_C = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \dots\dots\dots(2.31)$$

Keterangan :

- Q_C = Kapasitansi kapasitor daya (kVAr)
- P = Daya aktif (kW)
- $\cos\phi_1$ = Faktor daya awal
- $\cos\phi_2$ = Faktor daya yang akan diperbaiki

Atau bisa juga dengan persamaan berikut :

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots(2.32)$$

Keterangan :

- Q_C = Daya reaktif kapasitor bank yang dibutuhkan (kVAr)
- Q_1 = Daya reaktif sebelum diperbaiki (kVAr)
- Q_2 = Daya reaktif yang ingin dicapai (kVAr)

Besar kapasitor yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$C = \frac{1}{2 \times \pi f X_C} \dots\dots\dots(2.33)$$

Atau

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f V^2} \dots\dots\dots(2.34)$$

2.10 ETAP

Software *ETAP Power Station 19.0.1* merupakan software yang digunakan untuk simulasi suatu jaringan tenaga listrik. Salah satunya adalah untuk mensimulasikan studi aliran beban suatu jaringan listrik. Dari simulasi yang dilakukan akan diketahui besarnya rugi-rugi daya dan kondisi profil tegangan pada sistem tenaga listrik. Dan dengan diketahui nilai tegangan, arus dan daya, maka dapat dilakukan analisis sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memperbaiki rugi-rugi daya yang terjadi dan memperbaiki profil tegangan pada jaringan tersebut.

[13]

