

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Terdahulu

Penulis melakukan studi literatur selanjutnya dengan mempelajari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya dan berkaitan dengan penelitian penulis sehingga dapat digunakan sebagai rujukan dan perbandingan pada metode penelitian serta hasil yang dicapai pada penelitian ini.

Penelitian sebelumnya pernah disusun oleh Rifal, Sukarno Budi Utomo dan Muhamad Haddin (2019) yang berjudul “ *Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Tambak Lorok – Bawen dengan menggunakan Etap 12.6.0*” Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Universitas Islam Negeri Agung Semarang. Hasil dari penelitian ini adalah hasil simulasi dengan software ETAP 12.6.0 dan perhitungan jatuh tegangan menunjukkan kondisi pada sistem transmisi 150 kV GI PLTG Tambak Lorok – Bawen menunjukkan hasil yang stabil, karena masih dalam kategori tegangan yang diperbolehkan aturan SPLN dengan jatuh tegangan 4,27 % yaitu 6,41 kV [1].

Penelitian sebelumnya pernah disusun oleh Juara Mangapul Tambunan, Djoko Susanto dan Rima Isyana Restuwangi (2017) yang berjudul “*Pengaruh Rugi-Rugi Saluran Pada Jaringan Transmisi Tegangan Menengah Penyulang E2 Gardu Induk Embalut Tenggarong*” jurusan teknik elektro, sekolah tinggi teknik PLN (STT-PLN). Hasil dari penelitian ini adalah hasil simulasi studi kasus-1 diperoleh hasil nilai tegangan mengalami *drop voltage* pada banyak gardu. Adapun tegangan gardu distribusi pada studi kasus-1 tidak memenuhi SPLN No.1 Tahun 1995 mengenai tegangan standar, dimana tegangan harus memenuhi persyaratan +5% dan -10% dari tegangan nominalnya dan penanggulangannya dengan merekonfigurasi jaringan pada penyulang E_1 , E_2 , dan E_3 , yaitu contohnya pada Bus TLD 178 dengan tegangan 17,391 kV dan Bus yang paling ujung yaitu Bus GRA 706 dengan tegangan 16,12 kV [2].

Penelitian sebelumnya pernah disusun oleh Agus Setiawan, Anggit Priatama (2021) dalam laporan akhirnya yang berjudul '*Analisa Rugi-Rugi Daya Pada Transmisi Tegangan Tinggi 150 kV Di PLN Sungguminasa*' Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Makassar. Membahas mengenai Rugi daya yang terjadi pada saat proses pengiriman dari GI sungguminasa ke GI bollangi selama sepuluh hari (10 hari) sebesar 16,797422 kWh. Rugi-rugi daya pada sistem transmisi merupakan hilangnya daya yang berakibatkan kerugian materi [3].

Penelitian sebelumnya pernah disusun oleh Nico Yupiter Siregar (2015) dalam laporan akhirnya yang berjudul '*Analisa Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi Tegangan 150 kV di PT. PLN (Persero) Sistem Khatulistiwa*' Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Universitas Tanjungpura. Membahas mengenai rugi-rugi daya aktif yang terjadi pada saluran transmisi sistem Khatulistiwa berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Newton-Raphson sebesar 10,464 MW atau sebesar 10.464 kW untuk (Sesco 170 MW) dan sebesar 14,267 MW atau sebesar 14.267 kW (Sesco 200 MW) [4].

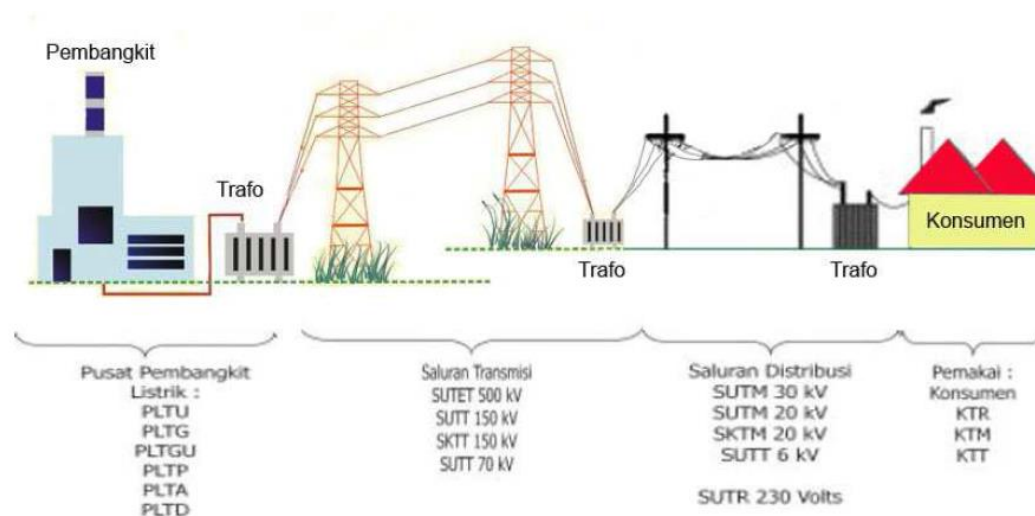
Jaelani, Zenny. 2013. "*Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi 500 kV dengan Menggunakan DigSilent (Studi Kasus Pada Saluran Transmisi Saguling-Bandung Selatan di PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali*". Universitas Pendidikan Indonesia, membahas tentang DIgSILENT menganalisis dengan mendapatkan hasil rugi-rugi daya yang kecil, tetapi DIgSILENT mengabaikan rugi-rugi korona karena nilainya yang kecil, sehingga bisa dibandingkan dengan keadaan real yang terjadi pada sistem. Analisis menggunakan DIgSILENT lebih efisien dan telah digunakan oleh perusahaan listrik negara dalam beberapa tahun ini untuk analisis sistem tenaga listrik[5].

Dari penelitian terdahulu yang dilakukan pada penelitian ini akan melakukan perbandingan rugi-rugi aliran daya pada saat kondisi sebelum dan setelah terinterkoneksi sistem Khatulistiwa. Adanya perkiraan beban yang dilakukan dari tahun 2022 sampai dengan 2026 dimana untuk mengetahui besarnya arus yang mengalir melalui saluran transmisi Sistem Khatulistiwa. Metode yang dilakukan untuk menganalisis hasil perhitunga aliran daya untuk menentukan berapa rugi-rugi pada saat kondisi sebelum dan setelah interkoneksi diantaranya metode Newton-

Rapshon. Selain itu proses penyelesaian pada analisis disimulasikan menggunakan perangkat lunak (*software*) MATLAB dan exel.

2.2 Pengertian Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat - pusat beban. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut [10] :



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen.

1. Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*)

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat pertama kali energi listrik dibangkitkan atau dihasilkan. Di sini terdapat turbin penggerak awal dan juga generator yang mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Terdapat beberapa jenis pusat pembangkit listrik yang biasanya dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit *hidro* (PLTA) dan pembangkit *thermal* (PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTP)

2. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya sampai pada konsumen/pengguna listrik.

3. Sistem Distribusi

Sistem distribusi ini merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan/konsumen dan berfungsi dalam hal pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari : pusat pengatur / gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah/jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah / jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan transformator [10].

2.3 Resistansi Saluran

Jenis-jenis penghantar yang digunakan pada saluran udara adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (*Cu* 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (*Cu* 97,5%), atau aluminium dengan konduktivitas 61% (*Al* 61%). (Hutahuruk, 1985:4)

Penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut [7]:

AAC : *All Aluminium Conductor*, yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC : *All Aluminium Alloy Conductor*, yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR : *Aluminium Conductor, Steel Reinforced*, yaitu penghantar aluminium berinti penghantar baja.

ACAR : *Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*, penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Menurut Saadat (1999:105). Resistansi saluran sangat penting dalam evaluasi efisiensi dan studi ekonomis saluran. Resistansi dc pada penghantar pada temperatur tertentu adalah :

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A} \text{ ohm} . \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

R_{dc} = Resistansi penghantar (Ohm)

ρ = Resistivitas (Ohm/m)

l = Panjang penghantar (meter)

A = Luas penampang penghantar (m^2)

Resistansi penghantar dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu : frekuensi, sifat pilin, dan temperatur. Bila arus bolak-balik yang mengalir dalam suatu penghantar, distribusi arusnya tidak merata pada permukaan penampang penghantar maka kerapatan arus akan lebih besar pada permukaan penghantar, hal ini akan menyebabkan resistansi ac akan lebih besar dari resistansi dc. Ini terjadi sebagai akibat dari adanya efek kulit (*skin effect*). Disebabkan oleh efek diatas, resistansi penghantar lebih baik ditentukan dari data pabrik [11].

2.4 Reaktansi Induktif Saluran

Dalam penurunan rumus-rumus untuk induktansi dan reaktansi induktif dari suatu penghantar biasanya diabaikan efek kulit (*skin effect*) dan efek sekitar (*proximity effect*). (Hutahuruk, 1985:9).

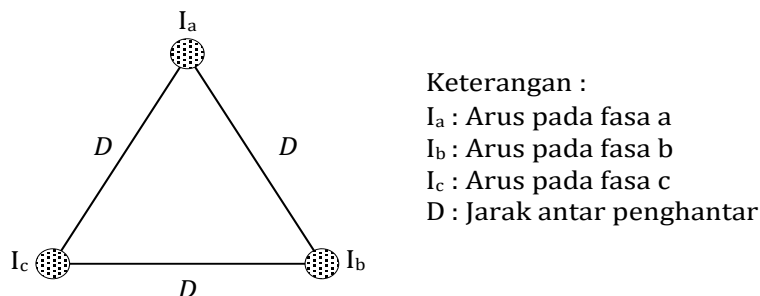
Efek kulit adalah gejala pada arus bolak-balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang penghantar tersebut makin besar ke arah permukaan penghantar. Tetapi bila kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hertz atau 60 Hertz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan [7].

Efek sekitar ialah pengaruh dari penghantar lain yang berada di samping penghantar yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius penghantar kecil terhadap jarak antara kedua penghantar maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

Saluran tiga fasa dapat dibedakan menurut susunan penghantarnya yaitu saluran tiga fasa dengan jarak penghantar sama dan saluran tiga fasa dengan jarak penghantar yang tidak sama [11].

2.4.1. Jarak Antar Ketiga Penghantar Sama (*Symmetrical spacing*)

Diasumsikan saluran tiga fasa dengan tiga penghantar, tiap-tiap memiliki radius r . Jarak simetris dalam konfigurasi segitiga di tunjukkan pada Gambar 2.2. dibawah ini [7]:



Gambar 2.2 Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak

Pada arus tiga fasa seimbang, diasumsikan :

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Total fluk lingkup (*flux linkage*) pada penghantar fasa a adalah :

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \text{ wb/m} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan :

$$I_b + I_c = -I_a$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} - I_a \ln \frac{1}{D} \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{D}{r'} \right) \text{ wb/m} \dots \dots \dots (2.4)$$

Disebabkan simetris, $\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c$, dan ketiga induktansi adalah identik, sehingga induktansi per fasa per kilometer panjang adalah :

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \text{ mH/km} \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana :

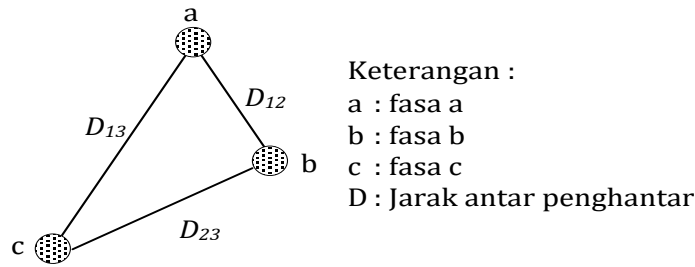
λ_a = fluk lingkup (*flux linkage*) penghantar fasa a

D = Jarak rata-rata geometris (*Geometric mean distance*)

D_s = Radius rata-rata geometris (*Geometric mean Radius*)

2.4.2. Jarak Antar Ketiga Penghantar Tidak Sama (*Asymmetrical spacing*)

Pada kenyataannya saluran tiga fasa tidak dapat dibentuk dengan jarak penghantar yang sama, disebabkan oleh pertimbangan konstruksi. Dengan jarak yang tidak sama, sekalipun dengan arus yang seimbang, jatuh tegangan pada induktansi saluran akan tak seimbang. Pada saluran tiga fasa dengan jarak tiga penghantar yang tidak sama ditunjukkan pada Gambar dibawah ini :



Gambar 2.3 Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Tidak Simetris

Fluk lingkup (*flux linkage*) pada tiga penghantar adalah :

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \text{wb/m} \\ \lambda_b &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \text{wb/m} \\ \lambda_c &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'} \right) \text{wb/m} \dots \dots \dots (2.6) \end{aligned}$$

atau dibentuk kedalam matrik :

$$[\lambda] = [L][I] \text{wb/m} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana matrik induktansi dengan simetris L adalah :

$$L = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{D_{13}} \\ \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{23}} \\ \ln \frac{1}{D_{13}} & \ln \frac{1}{D_{23}} & \ln \frac{1}{r'} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.8)$$

Untuk arus tiga fasa seimbang dengan I_a sebagai referensi, kita mendapatkan :

$$\begin{aligned} I_b &= I_a \angle 240^\circ = a^2 I_a \\ I_c &= I_a \angle 120^\circ = a I_a \end{aligned}$$

Hasil substitusi persamaan ke dalam persamaan adalah :

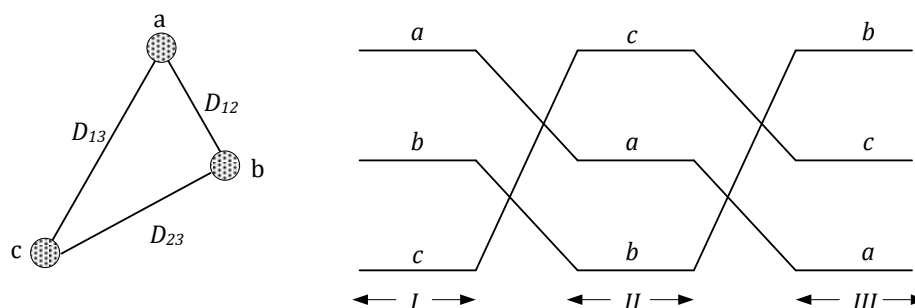
$$\begin{aligned} L_a &= \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ L_b &= \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \end{aligned}$$

$$L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right) H/Km \dots \dots \dots (2.9)$$

Pengujian dari persamaan menunjukkan bahwa induktansi fasa tidak sama dan mengandung istilah imajiner karena induktansi bersama.

2.4.3. Transposisi Saluran

Transposisi digunakan untuk mengatasi tidak simetris nya posisi penghantar. Penghantar tiap-tiap fasa ditransposisi sehingga tiap-tiap fasa menduduki posisi penghantar untuk 1/3 dari panjang nya. Keadaan ini membutuhkan paling sedikit dua titik transposisi, sehingga membagi jarak itu dalam tiga daerah yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Keterangan :
 a : fasa a
 b : fasa b
 c : fasa c
 D : Jarak antar penghantar

Gambar 2.4 Transposisi Saluran Tiga Fasa

Pada transposisi saluran tiap-tiap fasa mengambil tiga posisi, induktansi per fasa dapat diperoleh dengan mencari nilai rata-rata nya :

$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3} \dots \dots \dots (2.10)$$

Catatan bahwa $a + a^2 = -1$, maka nilai rata-rata menjadi :

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left(3 \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r'} \dots \dots \dots (2.11)$$

Atau induktansi per fasa per kilometer adalah :

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} mH/Km \dots \dots \dots (2.12)$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$$

dimana :

GMD = Jarak rata-rata geometris (*Geometric mean distance*)

D_s = Radius rata-rata geometris (*Geometric mean Radius*)

2.5 Sistem Per-Unit (p.u)

Menurut Gonen (1988:23). Dalam banyak masalah kelistrikan perlu dinyatakan skala atau normalisasi besaran ukur (satuan). Umumnya hal ini dilakukan dalam analisis sistem tenaga dan metode yang standard dipakai adalah sistem per-unit (p.u).

Secara historis telah banyak dilakukan untuk mempermudah proses perhitungan, terutama bila dilakukan dengan tangan. Juga telah terbukti keuntungannya setelah dipergunakan dalam proses komputer.

Keuntungan lain dari penggunaan sistem per-unit adalah [7]:

1. Analisis jaringan akan lebih sederhana bila semua impedansi dari rangkaian pengganti yang diberikan dapat secara langsung dijumlahkan tanpa mempersoalkan sistem tegangannya.
2. Dapat memudahkan proses-proses pembagian dan perkalian akar 3 atau ($\sqrt{3}$) yang diperlukan saat sistem 3ϕ seimbang dinyatakan oleh sistem per-fasa. Dengan demikian faktor $\sqrt{3}$ dan 3 yang menyatakan besaran untuk Δ dan Y. Dalam sistem 3ϕ seimbang, secara langsung sudah dicakup oleh besaran dasar.
3. Umumnya impedansi peralatan listrik diberikan dalam % atau p.u oleh pabrik berdasarkan kapasitas identifikasinya.
4. Karakteristiknya (kinerja) yang berbeda dari banyak peralatan listrik dapat diestimasi dengan suatu perbandingan dan konstanta yang dinyatakan dalam p.u.
5. Konstanta mesin-mesin dapat secara mudah diperoleh sejak parameter-parameter peralatan perlengkapan yang sama masih dalam batas-batas ambang yang relatif dan tentunya dapat dibandingkan jika dinyatakan dalam per-unit berdasarkan kapasitas nominalnya.
6. Pemakaian sistem per-unit banyak mempermudah proses perhitungan dalam analisis sistem tenaga.

Untuk memudahkan perhitungan atau analisa pada sistem tenaga listrik biasanya dipakai nilai-nilai dalam “satuan” atau dalam “per-unit”. Nilai-nilai yang dinyatakan dalam satuan ini ialah nilai yang sebenarnya ada dibagi nilai dasar (*base value*).

$$\text{Nilai dalam pu} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai dasar}}$$

Sebagai contoh, arus :

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3}kV_{base}} \times 1.000 \text{ Amp} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$I_{pu} = \frac{I_{actual}}{I_{base}} \text{ pu} \dots\dots\dots (2.14)$$

Impedansi :

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \text{ pu} = \frac{(R+jX) \times L}{Z_{base}} \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

MVA_{base} : Daya dasar dalam MVA

kV_{base} : Tegangan dasar dalam kV

I_{base} : Arus dasar dalam Ampere

I_{pu} : Arus dalam pu

I_{actual} : Arus sebenarnya dalam Ampere

Z_{base} : Impedansi dasar dalam Ohm

Z_{pu} : Impedansi dalam pu

Z_{actual} : Impedansi sebenarnya dalam Ohm

Pada transformator daya pada umumnya informasi nilai reaktansi menggunakan nilai persentase.

Reaktansi transformator daya dengan daya dasar baru :

$$Xt_{new} = Xt_{old} \times \frac{MVA_{new}}{MVA_{old}} \times \frac{kV_{old}^2}{kV_{new}^2} \text{ pu} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

Xt_{new} = Reaktansi transformator baru [pu]

Xt_{old} = Reaktansi transformator lama [pu]

MVA_{new} = Daya dasar baru [MVA]

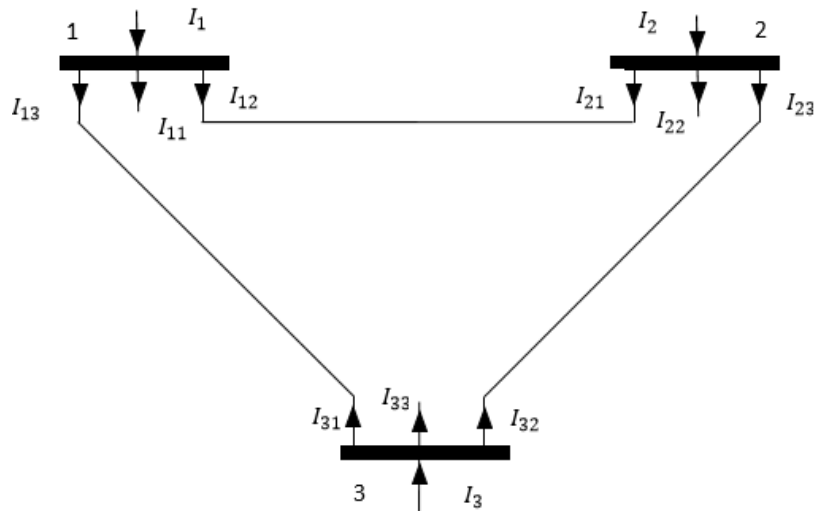
MVA_{old} = Daya dasar lama [MVA]

kV_{new} = Tegangan dasar baru [kV]

kV_{old} = Tegangan dasar lama [kV]

2.6 Bentuk Matriks Admitansi Bus

Berdasarkan hukum Hukum Arus Kirchoff impedansi-impedansi di ubah ke admitansi-admitansi yang terlihat seperti pada Gambar 2.5 [7].



Gambar 2.5 Sistem Tenaga Dengan 3 Bus

Pada hukum kirchoff

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{11} + I_{12} + I_{13} \\
 &= V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \\
 &= V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \\
 &= Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3 \dots\dots\dots(2.18)
 \end{aligned}$$

$$I_2 = V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22} + V_3 Y_{23} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$I_3 = V_3 Y_{31} + V_2 Y_{32} + V_3 Y_{33} \dots\dots\dots(2.20)$$

Persamaan – persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

jika persamaan matriks lebih banyak (n) maka persamaan – persamaan ini dapat disusun sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dari sini dapat di tulis persamaan arus untuk sistem n-bus , dimana masing-masing simpul terhubung satu sama lain dan rumus umumnya persamaan (2.21) sebagai berikut :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q, \quad p = 1,2,3 \dots\dots\dots(2.22)$$

2.7 Persamaan-persamaan Aliran Daya

1. Persamaan Pembebanan

Daya aktif dan daya reaktif pada salah satu bus p [7]:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* i_{pq} \dots\dots\dots(2.23)$$

dan arus

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \dots\dots\dots(2.24)$$

I_p Bertanda positif bila arus ke bus dan bertanda negatif bila arus mengalir dari bus, dan tanda menunjukkan susut fasa tertinggal (*lagging*).

Bila elemen shunt tidak termasuk dalam matrik maka arus total pada bus p adalah :

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - Y_p V_p \dots\dots\dots (2.25)$$

2. Persamaan Aliran Arus

Setelah tegangan-tegangan diketahui maka arus yang mengalir dari bus p ke bus q dapat diketahui sebagai berikut :

$$I_{pq} = (V_p - V_q)Y_{pq} + \frac{V_p Y_{pq}}{2} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana:

Y_{pq} = admitansi saluran p ke q

Y_{pq}' = admitansi saluran p – q

$\frac{V_p Y_{pq}}{2}$ = kontribusi arus pada bus p oleh arus shunt

3. Persamaan Daya

Daya kompleks yang mengalir dari bus p ke bus q :

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p * i_{pq} = S_{pq} \dots\dots\dots (2.27)$$

atau

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p * (V_p - V_q)y_{pq} + V_p * \frac{V_p y_{pq}}{2} = S_{pq} \dots\dots\dots (2.28)$$

Sedangkan daya kompleks yang mengalir dari bus q ke bus p

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q * (V_q - V_p)y_{qp} + V_q * \frac{V_q y_{qp}}{2} = S_{qp} \dots\dots\dots (2.29)$$

Jumlah aljabar persamaan (2.28) dan (2.29) adalah rugi-rugi pada transmisi yaitu seperti persamaan (2.30) berikut:

$$SL_{pq} = S_{pq} + S_{qp} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana :

SL_{pq} = Rugi-rugi saluran bus p ke bus q

S_{pq} = Daya kompleks mengalir dari bus p ke bus q

S_{qp} = Daya kompleks mengalir dari bus q ke bus p

2.8 Aliran Daya Dengan Metode *Newton-Rapson*

Studi aliran daya, biasanya dikenal dengan *loadflow*, adalah bagian penting dalam analisa sistem tenaga. Pada umumnya perhitungan aliran daya berguna untuk perencanaan, penjadwalan ekonomis, dan kontrol pada sistem ekisting untuk pengembangan dimasa yang akan datang. Permasalahan aliran daya terdiri dari nilai tegangan dan sudut fasa tegangan pada tiap-tiap bus dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada tiap saluran. Pada solusi permasalahan aliran daya, sistem diasumsikan dalam operasi seimbang dan digunakan model per fasa. Tiap bus dalam sistem tenaga listrik melibatkan empat besaran yaitu : daya aktif (P), daya reaktif (Q), tegangan (V) dan sudut fasa tegangan (δ).

Bus-bus sistem umumnya diklasifikasikan dalam tiga tipe yaitu [7]:

1. *Slack bus*, dikenal sebagai *swing bus* diambil sebagai referensi dimana tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan δ diketahui. Bus ini menghasilkan perbedaan antara beban terjadwal dengan daya yang dibangkitkan karena disebabkan oleh rugi-rugi pada saluran.
2. Bus beban (*load bus*), pada bus ini daya aktif P dan daya reaktif Q diketahui. Tegangan dan sudut fasa tegangan belum diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-Q.
3. *Regulated bus*, bus ini merupakan bus pembangkit yang dikenal dengan bus kontrol tegangan. Pada bus ini daya aktif dan tegangan diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-V.

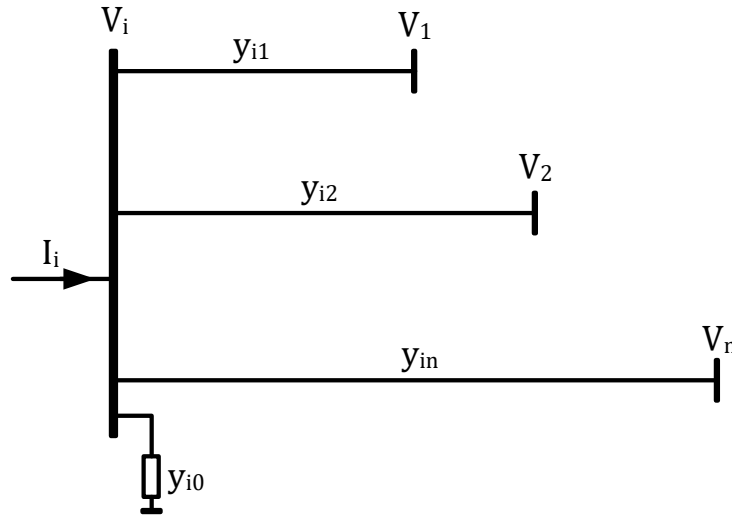
Menurut tipikal bus pada sistem tenaga yang ditunjukkan pada Gambar 2.6, saluran transmisi direpresentasikan oleh model saluran π dimana impedansi saluran telah dikonversikan pada admitansi per unit berdasarkan MVA dasar. Menggunakan hukum *Kirchoff* untuk arus (*Kirchoff Current Law*) pada bus diperoleh :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \dots \dots \dots (2.31)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \dots\dots\dots(2.32)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.33)$$



Gambar 2.6 Tipikal Bus Pada Sistem Tenaga

Daya aktif dan reaktif pada bus i adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots(2.34)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots(2.35)$$

Substitusi I_i kedalam persamaan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.36)$$

Dari hubungan diatas, rumus matematika permasalahan aliran daya menghasilkan persamaan aljabar non-linier yang harus dipecahkan dengan dengan teknik iterasi. Untuk sistem tenaga yang kompleks aliran daya dengan metode *Newton- Rapshon* lebih efisien dan praktis. Untuk tipikal bus pada sistem tenaga yang ditunjukkan pada Gambar 2.6, arus masuk ke bus i merupakan persamaan

(2.31). Persamaan dapat ditulis kembali dalam bentuk matrik bus admitansi sebagai [8]:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2.37)$$

Pada persamaan diatas, j termasuk bus i . Dalam bentuk polar diperoleh persamaan :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.38)$$

Daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(2.39)$$

Substitusi persamaan (2.37) untuk I_i ke dalam persamaan (2.39)

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.40)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.41)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.42)$$

Dengan bantuan Deret Taylor, fungsi nonlinier menjadi linier sehingga :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.43)$$

Persamaan diatas dapat ditulis secara singkat sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.44)$$

Elemen J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.45)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.46)$$

Elemen J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.47)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.48)$$

Elemen J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.49)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.50)$$

Elemen J_4 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.52)$$

Nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah perbedaan nilai terjadwal dan perhitungan yang dikenal sebagai daya residu, yang dinyatakan oleh :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots (2.53)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots (2.54)$$

Perkiraan terbaru untuk tegangan bus adalah :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots (2.55)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots (2.56)$$

Prosedur solusi aliran daya dengan metode *Newton- Rapshon* adalah sebagai berikut :

1. Untuk bus-bus beban (bus P-Q) dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} telah diketahui. Tegangan dan sudut fasa disetting sama dengan nilai slack bus yaitu $|V_i^{(0)}| = 1,0 pu$ dan $\delta_i^{(0)} = 0,0$. Untuk bus-bus kontrol tegangan (bus P-V) dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} telah diketahui, sudut fasanya disetting sama dengan nilai slack bus yaitu $\delta_i^{(0)} = 0,0$.
2. Untuk bus-bus beban P_i^{sch} dan Q_i^{sch} dihitung dengan persamaan (2.41) dan (12), serta $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (2.53) dan (2.54).
3. Untuk bus-bus kontrol tegangan $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (2.41) dan (2.53).
4. Elemen-elemen matrik Jacobian (J_1, J_2, J_3 , dan J_4) dihitung dengan persamaan (2.45) sampai dengan persamaan (2.52).
5. Persamaan linier simultan pada persamaan (2.44) dihitung secara langsung dan faktorisasi optimal dan eliminasi *Gaussian*.
6. Tegangan dan sudut fasa bus terbaru dihitung dengan persamaan (2.55) dan (2.56).
7. Proses perhitungan dilanjutkan sampai nilai residu $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ kurang dari toleransi yang telah ditentukan. Misalnya :

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

Dimana :

$$P_i^{sch} = \text{Daya aktif terjadwal [MW]}$$

$$Q_i^{sch} = \text{Daya reaktif terjadwal [MW]}$$

$$V_i = \text{Tegangan bus ke-i [pu]}$$

$$\delta_i = \text{Sudut fasa tegangan bus ke-i [rad]}$$

$$\Delta P_i^{(k)} = \text{Daya aktif residu pada iterasi ke-k [MW]}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = \text{Daya reaktif residu pada iterasi ke-k [MW]}$$

2.9 Tegangan-Tegangan Standar PT. PLN (Persero) SPLN T6.001:2013

Tabel berikut menunjukkan nilai tegangan sistem fase tiga empat kawat dan sistem fase tunggal tiga kawat termasuk rangkaian fase tunggal (perluasan, pelayanan dan sebagainya) yang dihubungkan kesistem tersebut.

Nilai yang lebih rendah dalam kolom adalah tegangan ke netral dari nilai yang lebih tinggi adalah tegangan antar fase. Jika hanya satu nilai yang ditunjukkan, maka nilai tersebut mengacu pada sistem tiga kawat dan menunjukkan tegangan antar fase [14].

Tabel 2.1 Sistem a.b Yang Diterapkan Pada Sistem Distribusi Tegangan Rendah

1.a Sistem Fase-Tiga Empat-Kawat
Tegangan nominal (V)
230/400
1.b sistem fase-tunggal tiga-kawat
Tegangan nominal (V)
2 x 230
Sistem fase-tunggal tiga kawat tidak dikembangkan

Dengan memperhatikan julat tegangan pasok, pada kondisi pelayanan normal direkomendasikan bahwa tegangan pada terminal pasok perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dan tegangan nominal sistem. Untuk julat tegangan pemanfaatan, selain variasi tegangan pasok, jatuh tegangan kemungkinan terjadi pada instalasi konsumen. Untuk instalasi tegangan rendah, turun tegangan ini dibatasi sampai dengan 5% (4% IEC), oleh karena itu julat tegangan pemanfaatan adalah +10% -5%

Tabel 2.2 Sistem Fase Tiga a.b Yang Bertegangan Nominal Antara 1 kV Sampai Dengan 35 kV Dan Perlengkapan Terkait

Tegangan Tertinggi Untuk Perlengkapan (kV)	Tegangan Nominal Sistem (kV)	Pemanfaatan
7,2 ¹⁾	6 ¹⁾	Pembangkit
12 ²⁾	11 ²⁾	Pembangkit
24	20	Distribusi dan Pembangkit

<p>Sistem fase-tiga tiga-kawat kecuali dinyatakan lain. Nilai yang ditunjukkan adalah tegangan antar fase.</p> <p>Tegangan tertinggi dan tegangan terendah perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem.</p>
<p>1) Nilai ini tidak digunakan untuk sistem distribusi umum.</p> <p>2) Tidak dikembangkan lagi.</p> <p>3) Untuk sistem fase-tiga empat kawat</p>

Tabel 2.3 Sistem Fase Tiga a.b yang Bertegangan Nominal Diatas 35kV Sampai Dengan 230kV Dan Perlengkapan Terkait

Tegangan Tertinggi Untuk Perlengkapan (kV)	Tegangan Nominal Sistem (kV)
72,5 kV	66 kV
170 kV	150 kV
Nilai tersebut di atas nilai tegangan antar fase	

Tabel 2.4 Sistem Fase Tiga a.b Yang Bertegangan Tertinggi Untuk Perlengkapan Melebihi 245kV

Tegangan Tertinggi Untuk Perlengkapan (kV)	Tegangan Nominal Sistem (kV)
300 kV	275 kV
550 kV	500 kV
Nilai tersebut di atas nilai tegangan antar fase	

Tabel 2.5 Perlengkapan yang Mempunyai Tegangan Sampai Dengan 220V a.s atau Sampai Dengan 400 V a.b

A.S		A.B	
Nilai nominal		Nilai nominal	
Lebih Disukai (Volt)	Pemanfaatan	Lebih Disukai (Volt)	Pemanfaatan
12 V	Telkom, SCADA, Radio, GH dan KIT	230/400 V	Rumah, Kantor, Gardu, Pusat Listrik.
24 V	Telkom, SCADA, Radio, GH dan KIT		
48 V	Telkom, SCADA, Radio, TP, SCADA		

110 V	Kontrol GI dan KIT		
220 V	Kontrol GI dan KIT		