

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik merupakan suatu konsep yang memberikan gambaran tentang baik atau buruknya mutu daya listrik akibat adanya beberapa jenis gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan. Ada beberapa alasan mengapa para ahli dan praktisi di bidang kelistrikan memberikan perhatian lebih pada kualitas daya (Melipurbowo, 2016), yaitu:

1. Pertumbuhan beban yang makin modern akan peka terhadap kualitas daya listrik, seperti kendali yang berbasis mikroprosesor dan perangkat – perangkat lainnya.
2. Meningkatnya perhatian yang ditekankan pada efisiensi sistem daya listrik secara menyeluruh, sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan penggunaan peralatan yang mempunyai efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan kapasitor untuk perbaikan faktor daya. Penggunaan peralatan-peralatan tersebut dapat mengakibatkan peningkatan terhadap tingkat harmonik pada sistem daya listrik, di mana para ahli merasa khawatir terhadap dampak harmonisa tersebut di masa mendatang yang dapat menurunkan kemampuan dari sistem daya listrik itu sendiri.
3. Para pengguna energi listrik mulai sadar akan kualitas daya listrik. Para pengguna utilitas kelistrikan menjadi lebih pandai dan bijaksana dalam persoalan pemeliharaan kualitas daya listrik serta merasa berkepentingan dalam meningkatkan kualitas daya listrik.
4. Para ahli Memikirkan resiko kegagalan yang akan merambat dikarenakan sistem jaringan tenaga listrik saling berhubungan satu dengan yang lainnya.

2.2 Listrik Dasar

Listrik dasar yang dapat digunakan di dalam teknik tenaga listrik, yaitu beda potensial atau sering disebut sebagai tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi. Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan di dalam permasalahan sistem tenaga listrik. Selain itu masih terdapat satu faktor penting di dalam pembahasan sistem tenaga listrik yaitu daya dan faktor daya.

2.3 Tegangan Listrik

Tegangan Listrik adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan unit muatan listrik dari satu tempat ke tempat lainnya. Tegangan listrik yang dinyatakan dengan satuan Volt ini juga sering disebut dengan beda potensial listrik karena pada dasarnya tegangan listrik adalah ukuran perbedaan potensial antara dua titik dalam rangkaian listrik.

Suatu benda dikatakan memiliki potensial listrik lebih tinggi daripada benda lain karena benda tersebut memiliki jumlah muatan positif yang lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah muatan positif pada benda lainnya. Sedangkan yang dimaksud dengan Potensial listrik itu sendiri adalah banyaknya muatan yang terdapat dalam suatu benda.

Tegangan listrik dapat juga dianggap sebagai gaya yang mendorong perpindahan elektron melalui konduktor dan semakin tinggi tegangannya semakin besar pula kemampuannya untuk mendorong elektron melalui rangkaian yang diberikan. Muatan listrik dapat di analogikan sebagai air di dalam sebuah tangki air, sedangkan tegangan listrik dapat di analogikan sebagai tekanan air pada sebuah tangki air, semakin tinggi tangki air diatas outlet semakin besar tekanan air karena lebih banyak energi yang dilepaskan. Demikian juga dengan tegangan listrik, semakin tinggi tegangan listriknya maka semakin besar energi potensial yang

dikarenakan semakin banyak elektron yang dilepaskan. Tegangan listrik diukur dengan satuan Volt yang dilambangkan dengan simbol huruf “V”. 1 Volt (satu Volt) dapat didefinisikan sebagai tekanan listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan 1 ampere arus listrik melalui konduktor yang beresistansi 1 ohm (Ilmi, 2019).

Adapun untuk tegangan listrik pada umumnya menggunakan rumus seperti berikut:

$$V = I \times R \quad (2.1)$$

Keterangan:

V = Beda Potensial atau Tegangan Listrik (Volt)

R = Hambatan (Ohm) Ω

I = Kuat Arus Listrik (Ampere)

Sedangkan untuk mencari tegangan apabila yang dikehauinya daya dan arus pada suatu sistem listrik maka:

$$V = \frac{P}{I \cdot \cos \phi} \quad (2.2)$$

Keterangan:

V = Beda Potensial atau Tegangan Listrik (Volt)

P = Daya (Watt)

I = Kuat Arus Listrik (Ampere)

$\cos \phi$ = Faktor daya (*Power Factor*)

Untuk standarisasi tegangan batas rendah dan batas atas diatur oleh standarisasi PUIL 2011 (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) yang menyatakan, Untuk tegangan dibatasi sampai dengan -10% dan +5% dari tegangan nominalnya.

2.3.1 Jenis Perubahan Tegangan Durasi Panjang

Gejala perubahan tegangan durasi panjang mempunyai waktu penyimpangan terhadap frekuensi dayanya selama lebih dari 1 menit. Jenis dari gejala variasi durasi panjang:

a. *Overvoltage*

Overvoltage, atau yang sering disebut juga sebagai "kelebihan tegangan," merujuk pada kondisi ketika tegangan listrik dalam suatu sistem atau peralatan melebihi tingkat yang dianggap aman atau normal. Diakibatkan karena:

- Gangguan Listrik, Saat terjadi gangguan listrik seperti petir atau korsleting, dapat menyebabkan lonjakan tegangan yang melebihi batas yang diizinkan
- Gangguan pada Transformator, Kerusakan atau gangguan pada transformator dapat menyebabkan terjadinya *overvoltage*.

b. *Undervoltage*

Kondisi di mana nilai tegangan dalam suatu sistem listrik turun di bawah batas yang diharapkan atau normal. Tegangan dapat dinyatakan sebagai tegangan arus bolak-balik (AC) atau tegangan searah (DC), tergantung pada konteksnya. Diakibatkan karena:

- Gangguan pada Transformator, Gangguan atau kerusakan pada transformator dalam sistem dapat mengakibatkan penurunan tegangan.
- Gangguan Listrik: Kondisi cuaca ekstrem atau gangguan listrik lainnya dapat menyebabkan fluktuasi tegangan, termasuk *undervoltage*.

2.4 Arus Listrik

Arus listrik atau dalam bahasa Inggris sering disebut dengan *Electric Current* adalah muatan listrik yang mengalir melalui media konduktor dalam tiap satuan waktu. Adapun menurut (Parhan, 2013) arus listrik merupakan gerakan elektron-

elektron yang mengalir ke suatu arah gerakan elektron tersebut. Arus listrik atau *Electric Current* biasanya dilambangkan dengan huruf “I” yang artinya “intensity (intensitas)”. Sedangkan satuan arus listrik adalah ampere yang biasa disingkat dengan huruf “A” atau “Amp” dihitung dengan menggunakan rumus (Ilmi, 2019). Seperti yang sudah dijelaskan diatas arus listrik ini diberi notasi I dalam satuan ampere (A), diambil dari nama Andre Marie Ampere 1775-1836.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

atau

$$I = \frac{P}{V \cdot \cos \phi} \quad (2.4)$$

Keterangan:

V = Beda Potensial atau Tegangan Listrik (Volt)

P = Watt (W)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Hambatan (ohm)

$\cos \phi$ = Faktor daya (*Power Factor*)

Arus juga ada yang dinamakan arus nominal dan arus maksimum maka dari itu muncul persamaan:

Untuk 1 fasa

$$I_n = \frac{P_{1 \text{ fasa}}}{V_f \cos \phi} \quad (2.5)$$

Untuk 3 fasa

$$I_n = \frac{P_{3 \text{ fasa}}}{V_{L-L} \sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Keterangan :

I_n = Arus nominal (A)

V_f = Tegangan Terpasang fasa-netral (V)

V_{L-L} = Tegangan fasa-fasa (V)

P = Daya Beban Terpasang (Watt)

$\cos \phi$ = Faktor Daya

2.4.1 Ketidakseimbangan Beban

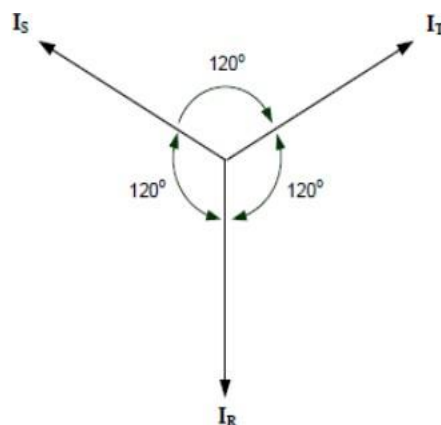
Ketidakseimbangan beban terjadi karena pembagian beban pada fasa R, S dan T pelanggan yang tidak merata / tidak sama besar, menyebabkan arus di kabel netral (Prasetya et al., 2020). Terdapat 2 jenis keadaan dalam beban:

2.4.2 Kondisi Ketidakseimbangan Beban

A. Beban Seimbang.

Beban listrik dapat dikatakan seimbang apabila syarat sebagai berikut dapat terpenuhi:

- Ketiga vektor arus/tegangan sama besar
- Ketiga vektor Saling membentuk sudut 120° satu sama lain, bisa dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 2. 1 Vektor beban Seimbang

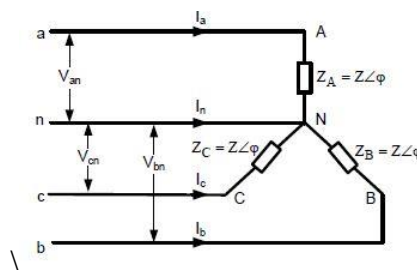
(PARDI, 2021)

Pada gambar 2.1 menunjukkan kondisi diagram arus dalam keadaan seimbang, dapat dilihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak akan muncul arus netral (PARDI, 2021). Akan tetapi pada penerapannya keadaan ideal sangat sulit terjadi karena tiap fasa pada sisi sekunder akan menyalurkan daya tiap fasa dengan beban yang berbeda tiap fasanya. Hal ini akan mengakibatkan beban tidak seimbang pada masing - masing fasanya, efek dari ketidakseimbangan fasa adalah timbul arus netral.

Akan tetapi pada sistem 3 fase terdapat 2 jenis yaitu Y dan Δ dan setiap jenis mempunyai persamaannya masing – masing:

1). Kondisi seimbang Y (WYE)

Menurut (Usrah, n.d.-b) fasa beban seimbang hubungan bintang 4 Line impedansi beban memiliki nilai yang sama, arus tiap fasa memiliki nilai yang sama dan perbedaan sudut sebesar 120° , dijelaskan oleh gambar 2.2 di bawah ini:



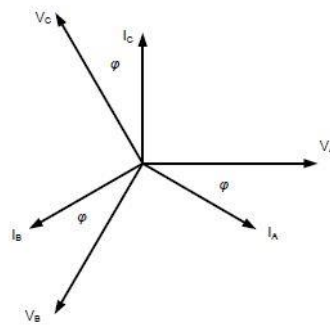
Gambar 2. 2 Beban Seimbang Terhubung Y (Wye)

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_A} = \frac{V_{an} \angle}{Z \angle \phi} = I_L \angle - \phi = I_L \angle - \phi \quad (2.5)$$

$$I_b = \frac{V_{bn}}{Z_B} = \frac{V_{bn} \angle - 120^\circ}{Z \angle \phi} = I_L \angle - 120^\circ - \phi \quad (2.6)$$

$$I_c = \frac{V_{cn}}{Z_C} = \frac{V_{cn} \angle 120^\circ}{Z \angle \phi} = I_L \angle 120^\circ - \phi \quad (2.7)$$

Digambarkan menggunakan diagram vektor seperti di bawah ini:

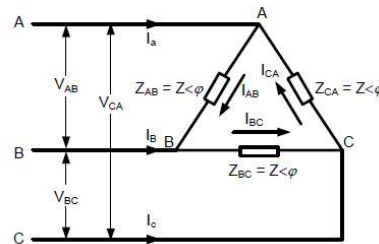


Gambar 2. 3 Diagram Vektor Arus Beban Seimbang Hubungan Y (WYE) (Usrah, n.d.-b)

Gambar 2.3 menjelaskan kondisi seimbang Y (WYE) dimana tegangan (V_A, V_B dan V_C) memiliki nilai sudut fasor yang sama, arus (I_A, I_B dan I_C) memiliki nilai sudut fasor dengan rentan 120° sehingga membentuk sudut ϕ yang ideal.

2). Kondisi seimbang Δ

Pada sistem delta, bila beban dipasangkan seara delta dengan impedansi sama besar dan membentuk rentan sudut 120° akan berada dalam kondisi seimbang. Untuk beban delta dapat digambarkan seperti berikut:



Gambar 2. 4 Beban Seimbang Terhubung Delta

Gambar 2.4 maka muncul persamaan untuk kondisi seimbang seperti berikut :

- Arus Fasa adalah arus yang mengalir didalam impedansi setiap fasa.

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{V_{AB}}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL} \angle -120^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL}}{Z} \angle -120^\circ - \phi = I_f \angle -120^\circ - \phi \quad (2.8)$$

$$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{V_{BC}}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL} \angle -240^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL}}{Z} \angle -240^\circ - \phi = I_f \angle -240^\circ - \phi \quad (2.9)$$

$$I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{V_{CA}}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL} \angle 120^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{V_{LL}}{Z} \angle 120^\circ - \phi = I_f \angle 120^\circ - \phi \quad (2.10)$$

- Arus Line adalah arus yang mengalir pada line penghantar.

$$I_a = I_{AB} - I_{CA} = I_f \angle -120^\circ - I_f \angle 120^\circ - \phi = \sqrt{3} I_f \angle -\phi \quad (2.11)$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB} = I_f \angle -240^\circ - I_f \angle -120^\circ - \phi = \sqrt{3} I_f \angle -\phi - 120^\circ - \phi \quad (2.12)$$

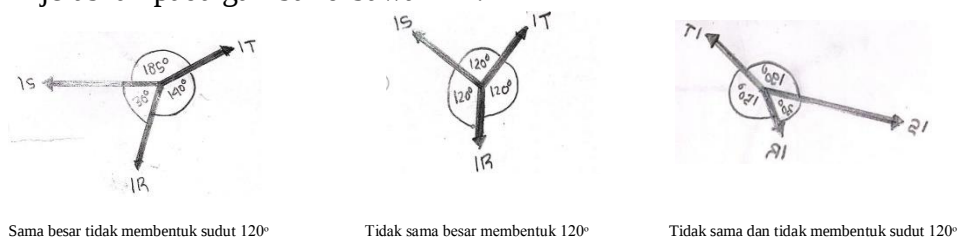
$$- I_c = I_{CA} - I_{BC} = I_f \angle 120^\circ - \varphi - I_f \angle -120^\circ - \varphi = \sqrt{3} I_f \angle 120^\circ - \varphi A \quad (2.13)$$

B. Beban Tidak Seimbang

Menurut keadaan tidak seimbang adalah salah satu keadaan satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Keadaan tidak seimbang yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Dijelaskan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 5 Vector Beban Tak Seimbang

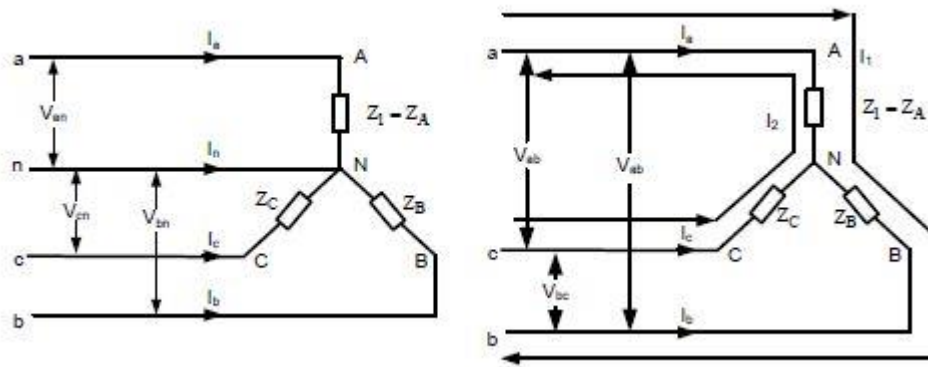
Pada gambar 2.5 arus yang tidak seimbang. Terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya tergantung kepada seberapa besar faktor ketidakseimbangan. Persamaan untuk menghitung nilai rata-rata pada suatu beban.

Standarisasi yang digunakan adalah (IEEE Std 446-1987) tentang batasan ketidakseimbangan beban yaitu 5% sampai dengan 20%.

1). Tidak Seimbang terhubung Y (WYE)

Untuk sistem empat line masing – masing fase mengalirkan arus yang tidak seimbang menuju netral. Sedangkan pada sistem tiga line akan mengakibatkan tegangan yang berubah cukup signifikan yang memicu munculnya suatu arus netral.

(Usrah, n.d.-b) Dijelaskan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 6 Beban Tak Seimbang Terhubung Bintang Empat Line (Tanamal et al., 2019)

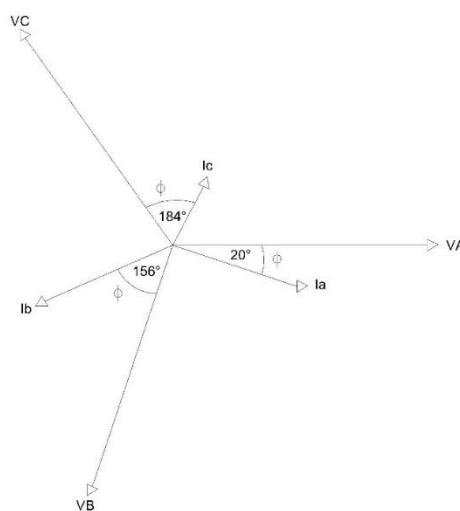
Dari gambar 2.6 didapatkan persamaan ketidakseimbangan arus pada tiap kawat dan harus dihitung perfasanya menggunakan persamaan dibawah dengan sudut fasa:

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{V_{an} \angle 0^\circ}{Z_a \angle \phi_a} = |I_a| \angle -\phi_a \text{ A} \quad (2.16)$$

$$I_b = \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{V_{bn} \angle -120^\circ}{Z_b \angle \phi_b} = |I_b| \angle -120^\circ - \phi_b \text{ A} \quad (2.17)$$

$$I_c = \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{V_{cn} \angle 120^\circ}{Z_c \angle \phi_c} = |I_c| \angle 120^\circ - \phi_c \text{ A} \quad (2.18)$$

Menurut (Tanamal et al., 2019) saat kondisi tidak seimbang maka kawat netral akan terdapat arus sehingga tidak lagi bernilai 0.

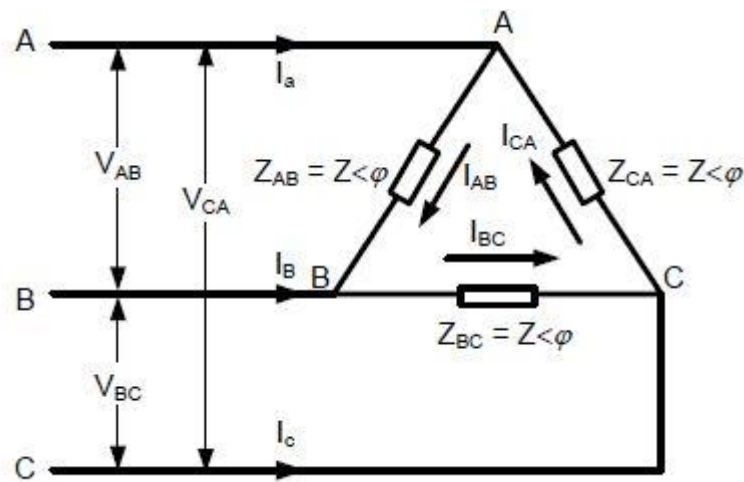


Gambar 2. 7 Diagram Vektor Arus Beban Tidak Seimbang Terhubung Y (WYE)

Gambar 2.7 menjelaskan kondisi tidak seimbang terhubung Y (WYE) dimana tegangan (V_A , V_B dan V_C) tidak memiliki nilai sudut fasor yang sama besar, arus (I_A , I_B dan I_C) tidak memiliki nilai sudut fasor dengan rentan 120° sehingga membentuk sudut φ yang tidak ideal.

2). Beban tidak Seimbang Delta Δ

Sebuah beban tidak seimbang terhubung delta pada sistem listrik dapat menghasilkan ketidakseimbangan dalam aliran arus dan tegangan. Sistem delta melibatkan tiga impedansi yang dihubungkan membentuk segitiga, ketidakseimbangan dapat terjadi jika impedansi atau karakteristik beban pada satu atau lebih fase tidak sama. Dijelaskan dengan diagram vektor di bawah ini:



Gambar 2. 8 Beban tidak seimbang terhubung delta (Sinaga et al., 2021)

Gambar 2.8 menjelaskan penyelesaian beban tidak seimbang menyangkut perhitungan arus-arus fasa dengan persamaan di bawah ini:

- Arus Fasa adalah arus yang mengalir didalam impedansi setiap fasa.
 - $$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{V_{AB} \angle 0^\circ}{Z_{AB} \angle \varphi_{AB}} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}} \angle 0^\circ - \varphi_{AB} = |I_{AB}| \angle 0^\circ - \varphi_{AB} \quad A \quad (2.19)$$
 - $$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{V_{BC} \angle -120^\circ}{Z_{BC} \angle \varphi_{BC}} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}} \angle -120^\circ - \varphi_{BC} = |I_{BC}| \angle -120^\circ - \varphi_{BC} \quad A \quad (2.20)$$

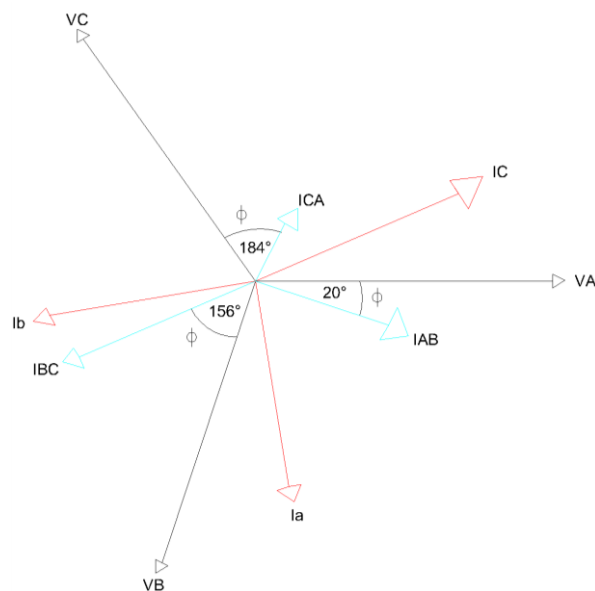
$$- I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{V_{CA} \angle 120^\circ}{Z_{CA} \angle \varphi_{CA}} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} \angle 120^\circ - \varphi_{CA} = |I_{CA}| \angle 120^\circ - \varphi_{CA} \text{ A} \quad (2.21)$$

- Arus Line adalah arus yang mengalir pada line penghantar.

$$- I_a = I_{AB} - I_{CA} = |I_{AB}| \angle (0^\circ - \varphi_{AB}) - |I_{CA}| \angle (120^\circ - \varphi_{CA}) = |I_a| \angle 0^\circ \text{ A} \quad (2.22)$$

$$- I_b = I_{BC} - I_{AB} = |I_{BC}| \angle (-120^\circ - \varphi_{BC}) - |I_{AB}| \angle (0^\circ - \varphi_{AB}) = |I_b| \angle -120^\circ \text{ B} \quad (2.23)$$

$$- I_c = I_{CA} - I_{BC} = |I_{CA}| \angle 120^\circ - \varphi_{CA} - |I_{BC}| \angle -120^\circ - \varphi_{BC} = |I_c| \angle 120^\circ \text{ C} \quad (2.24)$$



Gambar 2. 9 Diagram Vektor Arus Beban Tidak Seimbang Terhubung Delta

Gambar 2.9 menjelaskan kondisi tidak seimbang terhubung Delta (Δ)

dimana tegangan (V_{AB} , V_{BC} dan V_{CA}) tidak memiliki nilai sudut fasor yang sama besar, arus (I_A , I_B dan I_C) tidak memiliki nilai sudut fasor dengan rentang 120° sehingga membentuk sudut φ yang tidak ideal.

2.5 Frekuensi

Frekuensi merupakan jumlah periode gelombang listrik yang terjadi tiap detik, penghitungan frekuensi itu sangatlah penting karena pada dasarnya pencatatan data

itu dapat berubah-ubah mengikuti frekuensi masukannya. Frekuensi biasanya dinyatakan dengan satuan hertz (Hz) dengan rumus (Agustianingsih et al., 2020).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.25)$$

Keterangan:

f = Frekuensi (Hz)

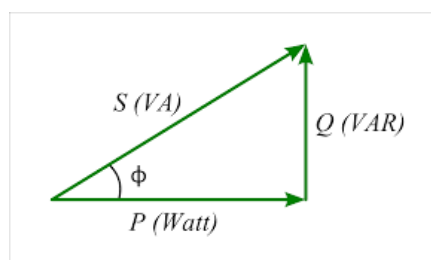
T = Periode (Detik)

Setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika berlaku frekuensi 60 Hz.

2.6 Daya Listrik

Daya Listrik adalah jumlah besaran listrik yang dapat diserap dalam rangkaian listrik. Satuan Daya adalah watt dinyatakan dengan banyaknya tegangan listrik yang mengalir persatuan waktu (joule/detik). Dalam rangkaian arus searah (DC) besarnya daya yang diserap oleh suatu beban listrik ditentukan dengan nilai tahanan beban serta besar arus yang mengalir pada beban tersebut.

Daya pada sistem tenaga listrik arus bolak balik (AC) dikenal dengan 3 macam yaitu daya reaktif, daya aktif dan daya semu. Hubungan ketiga macam daya ini disebut dengan segitiga daya dan digambarkan seperti dibawah ini:



Gambar 2. 10 Segitiga Daya

Gambar 2.10 menjelaskan daya aktif (P) satuan watt panah kanan lurus, daya reaktif (Q) satuan VAR dengan panah lurus ke atas, daya semu (S) Satuan

VA dengan panah miring ke atas dan ketiga parameter ini membentuk sudut $\cos \varphi$.

2.6.1 Daya Aktif (P) Watt

Satuan Daya Aktif adalah Watt (W), daya aktif juga disebut nilai daya real yang dikonsumsi dan dibutuhkan oleh beban. Daya aktif merupakan energi yang mengalir dan akan dikonversikan oleh beban menjadi bentuk energi lainnya, dengan persamaan di bawah ini:

- 1 fase

$$P_{1\phi} = V_{L-N} \times I_L \times \cos \varphi \quad (2.26)$$

- 3 fase

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \times \cos \varphi \quad (2.27)$$

Keterangan :

P = daya aktif (watt)

V= Tegangan (volt)

I = arus (amper)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.6.2 Daya Reaktif (Q) VAR

Menurut (Suseno Dan Dkk, 2019) Daya reaktif merupakan jumlah daya yang diperlukan untuk membentuk medanmagnet, pembentukan medan magnet nantinya akan membentuk fluks. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator,motor, lampu pijar dan lain-lain, satuan daya reaktif adalah volt ampere reactive (VAR) dengan persamaan seperti dibawah ini:

- 1 fase

$$Q_{1\phi} = V_{L-N} \times I_L \times \sin \varphi \quad (2.28)$$

- 3 fase

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \times \sin \varphi \quad (2.29)$$

Keterangan

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Sin φ = Faktor Reaktif

2.6.3 Daya Semu (S) VA

Daya semu merupakan perkalian tegangan dan arus dalam suatu jaringan atau perkalian trigonometri daya reaktif dan daya aktif. Daya semu adalah daya yang keluar dari sumber alternation current (AC) atau daya yang diserap beban. Satuan dari daya semu yaitu volt ampere (VA). (Suseno Dan Dkk, 2019) persamaan daya semu:

- 1 fasa

$$S_{1\phi} = V_{L-N} \times I_L \quad (2.30)$$

- 3 fase

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \quad (2.31)$$

Keterangan

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.7 Faktor Daya

Menurut (Agustianingsih et al., 2020) Faktor daya adalah gambaran sudut fasa antara daya aktif dan daya semu yang terdapat pada segitiga daya. Faktor daya juga merupakan besaran dari hasil perbandingan antara daya aktif dan daya semu di dalam sebuah rangkaian listrik. Adapun rumus atau perhitungan yang digunakan sebagai berikut:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.32)$$

Keterangan:

$\cos \varphi$ = Faktor daya

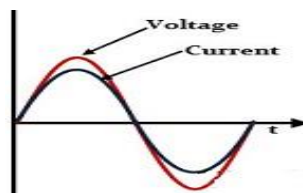
P = Daya nyata (W)

S = Daya semu (VA)

2.7.1 Sifat Faktor Daya

Dalam sistem tenaga listrik memiliki 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya satu (*unity*), faktor daya mendahului (*leading*) dan faktor daya terbelakang (*lagging*), biasanya pada suatu sistem tenaga listrik memiliki 3 jenis faktor daya :

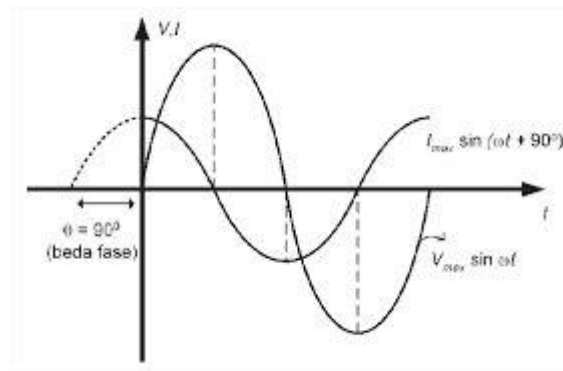
- 1) Faktor daya bernilai satu (*unity*) adalah suatu keadaan saat nilai $\cos \varphi$ bernilai 1 dan tegangan sumber fasa dengan arus ke beban, dan faktor daya ini terjadi apabila beban resistif murni.



Gambar 2. 11 Gelombang Faktor Daya *Unity*

Gambar 2.11 merupakan gelombang arus dan tegnagan yang bernilai $\cos \varphi$ sebesar 1.

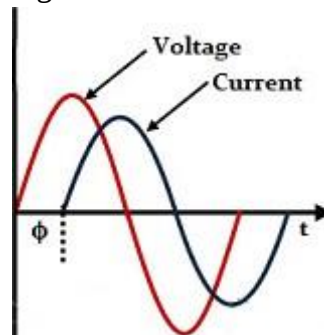
- 2) Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan dimana faktor daya memiliki kondisi beban listrik yang bersifat kapasitif, keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memberikan daya reaktif dari beban bersifat kapasitif dan keadaan kondisi fase arus mendahului fase tegangan sebesar sudut φ . (Farhany, 2016) apabila arus mendahului tegangan maka faktor daya dikatakan “*leading*”.



Gambar 2. 12 Gelombang Faktor Daya *Leading*

Gambar 2.12 merupakan gelombang arus mendahului tegangan, dimana kondisi beban memberikan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat kapasitif.

- 3) Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan dimana faktor daya memiliki beban atau peralatan listrik bersifat induktif. Dimana fase tegangan mendahului arus sebesar sudut ϕ maka faktor daya ini dikatakan “*lagging*” dijelaskan menggunakan gambar di bawah ini:



Gambar 2. 13 Gambar Faktor Daya *Lagging* (Farhany, 2016)

Gambar 2.13 Merupakan gelombang tegangan mendahului arus, dimana kondisi beban memerlukan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat induktif.

2.8 Kuat Hantar Arus

Penghantar listrik atau konduktor listrik adalah bahan atau material yang memungkinkan aliran arus listrik melaluinya, konduktor memiliki jumlah elektron bebas yang banyak dan memungkinkan elektron-elektron ini bergerak dengan mudah di dalam bahan tersebut seperti tembaga, aluminium dan perak.

PUIL 2011 menjelaskan bahwa kuat hantar arus (KHA) merupakan arus yang dapat dialirkan secara terus menerus oleh penghantar pada suatu keadaan tertentu tanpa menimbulkan kenaikan suhu, dalam persamaan (KHA) ini digunakan rumus:

$$KHA = 125\% \times I_{nominal} \quad (2.33)$$

$$KHA \text{ sirkit utama} = KHA \text{ terbesar} + \sum \text{in cabang lainnya} \quad (2.34)$$

$$KHA \text{ sirkit cabang} = KHA \text{ terbesar} + \sum \text{in sirkit akhir} \quad (2.35)$$

2.8.1 Luas Penampang Kabel Instalasi Listrik

Ada beberapa point yang mengatur luas penampang penghantar sesuai dengan PUIL 2011 :

- Suhu maksimum yang diizinkan
- Susut tegangan yang diizinkan
- Stres elektromagnetik yang mungkin terjadi hubung pendek
- Stres mekanis lainnya yang mungkin dialami penghantar

Tabel 2. 1 KHA kabel NYAF

Jenis Penghantar	Luas Penampang Nominal mm ²	KHA Terus Menerus		KHA Pengenal gawai Proteksi	
		Pemasangan dalam conduit ^(x) sesuai 7.13A	Pemasangan diudara ^(xx) sesuai 7.12.1 A	Pemasangan dalam conduit A	Pemasangan di udara A
1	2	3	4	5	6
NYFA					
NYFAF	0,5	2,5	-	2	-
NYFAZ	0,75	7	15	4	10
NYFAD					
NYA	1	11	19	6	10
NYAF	1,5	15	24	10	20
	2,5	20	32	16	25
NYFAw					

NYFAF w	4	25	42	20	35
NYFAZ w	6	33	54	25	50
NYFAD w	10	45	73	35	63
NYL					
	16	61	98	50	80
	25	83	129	63	100
	35	103	158	80	125
	50	132	198	199	160
	70	265	245	125	200
	95	197	292	160	250
	120	235	344	250	315
	150	-	391	-	315
	185	-	448	-	400
	240	-	5285	-	400
	300	-	608	-	500
	400	-	726	-	630
	500	-	830	-	630

Tabel 2.1 merupakan KHA kabel NYAF menurut PUIL 2011 mengatur luas penampang dan jenis.

Tabel 2. 2 KHA kabel NYY

Jenis	Luas Penampang mm ²	KHA terus menerus					
		Berinti tunggal		Berinti dua		Berinti tiga dan empat	
		Di tanah A	Di udara A	Di tanah A	Di udara A	Di tanah A	Di udara A
1	2	3	4	5	6	7	8
	1,5	40	26	31	20	26	18,5
	2,5	54	35	41	27	34	25
NYY	4	70	46	54	37	44	34
NYBY	6	90	58	68	48	56	43
NYFGbY	10	122	79	92	66	75	60
NYRGbY	16	160	105	121	89	98	80

NYCY	25	206	140	153	118	128	106
NYCWY	35	249	174	187	145	157	131
NYSY	50	296	212	222	176	185	159
NYCEY	70	365	269	272	224	228	202
NYSEY	95	438	331	328	271	275	244
NYHSY	120	499	386	375	314	313	282
NYKY	150	561	442	419	361	353	324
NYKBY	185	637	511	475	412	399	371
NYKFGbY	240	743	612	550	484	464	436
NYKRGbY	300	843	707	525	590	524	481
	400	986	859	605	710	600	560
	500	1125	1000	-	-	-	-

Tabel 2.2 merupakan KHA kabel NYY menurut PUIL 2011 mengatur luas penampang dan jenis.

2.8.2 Pemilihan Kabel

PUIL 2011 juga mengatur penggunaan dan jenis konstruksi baik untuk instalasi maupun kabel fleksibel, berikut di bawah ini konstruksi kabel dan penggunaannya dijelaskan oleh Tabel 2.3 dibawah ini:

Tabel 2. 3 Kegunaan Kabel

Jenis Kabel	Tegangan	Jumlah inti	Luas Penampang mm ²	Penggunaan
Thermo plastik NYFA, NYFAF	230/400	1,3 dan 4 2 dan 3	0,5 dan 0,75	Untuk pasangan tetap
Thermo plasti tahan panas sampai 150° C NYFA _w , NYFA _f _w , NYFAZ _w , NYFAD _w , kabel rumah thermo plastik NYA dan NYAF	230/400 400/690	1,3 dan 4 2 dan 3 , 1	0,5 – 1,0 0,5 dan 0,75 0,5 - 400	Untuk pasangan tetap di dalam dan pada lampu dalam pipa yang dipasang diatas atau di dalam plaster
Kabel thermo plastik khusus	400/690	1	1,5-400	Untuk pasangan tetap.

				Didalam dan pada lampu dalam pipa yang dipasang di atas atau dalam plesteran.
Kabel lampu thermo plastik	4000-8000	1	1,5	Hanya di dalam pipabaja dalamUdara.
Kabel thermo plastik pipih NYIF NYIFY	230/400	2-5	1,5-2,5	Di dalam dandi bawah plesteran, dalam kamar mandi.
Kabel rumah thermo plastik berselubung NYM dan NYM-O	230/400	1-5 2-3	1,5-35	Di atas, di dalam, di bawah plesteran dan juga pada kayu.
Kabel thermo plastik berperisai logam berselubung thermo plastik NYRUZY NYRUYr	300/500	2-51	1,5-25	Di atas, di dalam, di bawah plesteran dan juga pada kayu.
Kabel tanah berisolasi dan berselubung thermo plastik NYY NAYY	600/1200	1-4	1,5-400	Kabel tenaga di dalam ruang saluran kabel dan di alam terbuka serta didalam tanah dengan perlindungan.
Kabel tanah berisolasi dan berselubung thermo plastikbaja NYBY NABY	600-1200	2...4 3 dan 4	4-400 25-400	Di dalam ruang, saluran kabel, dan di bawah tanah untuk instalasi industri dan

				lemari penghubung.
Kabel tanah berisolasi dan berselubung thermo plastik dengan penghantar konsentrik NYCY NYCWY	600/1200	2..4	1,5-40	Di dalam ruang saluran kabel dan di bawah tanah untuk instalasi industri dan lemari penghubung.
Kabel tanah berisolasi dan berselubung thermo plastik dengan perisai pita baja NYFGbY NYRGbY	600/1200	1..4 3...4	1,5-400 25...	Di atas, di dalam, dan di bawah plesteran dan juga ada pada kayu

2.9 Perhitungan Susut Jaringan Tegangan Rendah

Langkah pertama yang dilakukan dalam mencari susut energi adalah menghitung terlebih dahulu jatuh tegangan, susut daya, susut daya rata-rata, daya masuk dan kemudian konversi energi setelah itu baru akan didapat nilai besar susut energi.

2.9.1 Susut Daya

Susut daya atau rugi daya listrik adalah kondisi berkurangnya pasokan daya yang didistribusikan sumber (pembangkit) ke beban (konsumen) yang diakibatkan tahanan yang dipengaruhi oleh arus dan tegangan. Rugi daya dapat dinyatakan dengan persamaan:

- Untuk sistem 3 Fasa

$$P = 3 \times I^2 \times R \quad (2.38)$$

- Untuk sistem 1 Fasa

$$P = I^2 \times R \quad (2.39)$$

Keterangan:

P = Rugi Daya (Watt)

I = Arus (A)

R = Tahanan Penghantar (Ω)

2.9.2 Susut Daya Rata-rata

Susut daya rata-rata dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P = I^2 \times R \times Fr \quad (2.40)$$

Keterangan:

P = Rugi Daya (Watt)

I = Arus (A)

R = Tahanan Penghantar (Ω)

Fr = Faktor Rugi

a. Faktor Beban (Fb)

Faktor beban adalah perbandingan antara beban rata-rata terhadap beban puncaknya. Beban rata-rata dan beban puncak dapat dinyatakan dalam ampere, kilovoltampere, kilowatt dan sebagainya. Faktor beban dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Faktor beban (Fb)} = \frac{\text{Beban rata-rata}}{\text{Beban Puncak}} \quad (2.41)$$

b. Faktor Rugi (Fr)

Sedangkan faktor rugi adalah perbandingan antara rugi daya rata-rata dengan rugi daya beban puncak, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Faktor rugi (Fr)} = \frac{\text{Rugi daya rata-rata}}{\text{Rugi Beban Puncak}} \quad (2.42)$$

Merujuk kepada penelitian (Syamsudin & Suyanto, 2015) terdapat hubungan antara keduanya yang diperkuat oleh peneliti Buller dan Wadrow yaitu:

- Untuk daerah Perkotaan

$$Fr = 0,3 Fb + 0,7 Fb^2 \quad (2.43)$$

- Untuk daerah Pedesaan

$$Fr = 0,16 Fb + 0,24 Fb^2 \quad (2.44)$$

2.9.3 Daya Masuk

Langkah selanjutnya menghitung daya tersalur menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{in} = V \times I \times \cos \varphi \times Fb \quad (2.45)$$

Keterangan:

P_{in} = Daya Masuk (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\cos \varphi$ = Faktor Daya

Fb = Faktor Beban

2.10 Perhitungan Susut di Penghantar Netral

Jika beban tiap fasa tidak seimbang akan ada arus di netral. Untuk menghitung susut pada penghantar netral menggunakan rumus:

$$P = I^2 \times R \times L \quad (2.46)$$

Keterangan:

P = Rugi Daya (Watt)

I = Arus (A)

R = Tahanan Penghantar (Ω)

L = Panjang Penghantar

2.11 Efisiensi Jaringan Tegangan Rendah

Dalam perhitungan efisiensi tegangan rendah mengacu kepada standarisasi PLN D3. 002-1 tahun 2007 dimana efisiensi yang diperbolehkan sebesar 90% - 100% perhitungannya sebagai berikut:

$$P_{out} = P_{in} - P_{loss} \quad (2.49)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.50)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya yang keluar (W)

P_{in} = Daya yang masuk (W)

P_{loss} = Susut Daya (W)

η = Efisiensi jaringan tegangan rendah (%)

2.12 Standarisasi Kualitas Daya

Standardisasi adalah suatu patokan atau pedoman yang digunakan untuk menjadi acuan minimal dalam mencapai keselarasan. Standar yang umumnya digunakan sebagai tolak ukur suatu objek dengan penentuan karakteristik dan spesifikasi tertentu yang dikenakan pada objek tersebut.

2.12.1 Standar Tegangan dan Frekuensi

Standar tegangan dan frekuensi terdapat di PUIL 2020 (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) yang menyatakan sebagai berikut:

- 1) Untuk tegangan dibatasi sampai dengan -4% dan +5% dari tegangan nominalnya.

Untuk frekuensi menggunakan standarisasi PUIL 2011 Persyaratan Umum Instalasi Listrik) yang menyatakan sebagai berikut:

- 2) Frekuensi nominal sistem adalah 50 Hz.

2.12.2 Standarisasi Ketidakseimbangan Beban

Sesuai dengan (IEEE Std 446-1987) tentang batasan ketidakseimbangan beban yaitu 5% sampai dengan 20%, dapat dilihat di tabel 2.4:

Tabel 2. 4 Rentang Khas Kualitas Daya Input dan Parameter Beban. Sumber: (IEE Std 446-1987)

Parameters	Range or Maximum
1) Voltage regulation steady state	+5, -10 to + 10%, -15% (ANSI C84.1 – 1970 is +6, -13%
2) Voltage harmonic distortion +	+ 150 to 200% for less than o.2ms
3) Frequency variation	60 Hz $\pm$ 0.5 Hz to $\pm$ 1 Hz
4) 3 ϕ , phase voltage unbalance	2.5 to 5%
5) 3 ϕ , load unbalance	5 to 20% maximum for any one phase

2.12.3 Standarisasi Faktor Daya

Standariasai Faktor Daya diatur oleh (IEEE Std 446-1987) dimana nilai faktor daya adalah $>0,8$.