

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Beban listrik

Beban listrik merupakan komponen listrik atau perangkat yang merupakan bagian dari rangkaian listrik yang mengkonsumsi energi listrik (daya) dan mengubahnya menjadi bentuk energi lain. Oleh karenanya, besar kecilnya beban beserta perubahannya tergantung pada kebutuhan tenaga listrik.(Saifuddin et al., 2018)

Sifat beban listrik

Jaringan listrik AC memiliki tiga jenis beban, yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Ketiga jenis beban tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda.

2.1.1 Beban resistif

Beban resistif yaitu jenis beban yang bersifat murni tahanan (resistor). Beban resistif hanya menyerap daya aktif, dan tidak menyerap daya reaktif. Gelombang arus dan tegangan yang melewati beban resistif akan selalu sama.(Saifuddin et al., 2018). Dalam matematis,dinyatakan rumus (2.1) untuk beban resistif .

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Keterangan :

R = hambatan (ohm)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (amper)

2.1.2Beban induktif

Beban induktif merupakan beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti coil, transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fasa (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat *lagging* yaitu arus tertinggal dari tegangan. Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. (Saifuddin et al., 2018) dalam matematis, rumus (2.2) untuk beban induktif.

$$X_L = 2\pi f \cdot L \quad (2.2)$$

Keterangan

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

L = Induktansi (H)

2.1.3Beban kapasitif

Beban kapasitif merupakan beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus *leading* yaitu arus mendahului tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. (Saifuddin et al., 2018). Dinyatakan dalam rumus (2.3)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (2.3)$$

Keterangan:

X_C = reaktansi kapasitif (Ω)

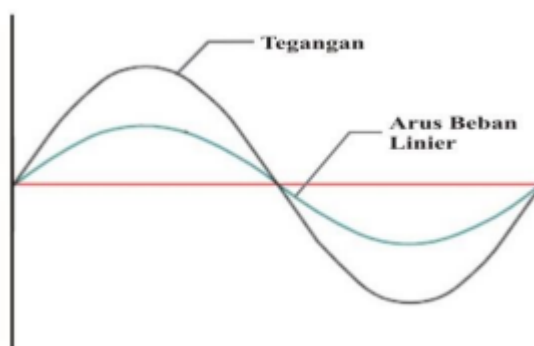
C = kapasitas kapasitor (F)

Jenis jenis beban listrik

Jenis beban listrik pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi 2 jenis, yaitu beban linier dan beban non-linier

2.1.4 Beban linier

beban linier merupakan beban yang impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktu. Beban linear ini mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linear akan sama dengan bentuk gelombang tegangan. Apabila diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linear juga merupakan sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa salah satu contoh beban linear adalah lampu pijar, pemanas, resistor, dan lain-lain (Sudibya & Irawaty, 2018). Dari gambar 2.1 menunjukkan gelombang arus dan tegangan beban linier.

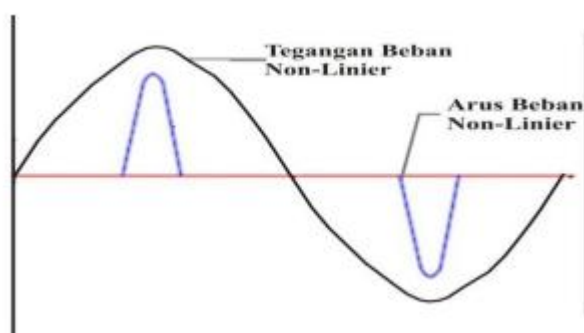


Gambar 2.1 Gelombang Arus Dan Tegangan Beban Linier.
(Sudibya & Irawaty, 2018)

2.1.5 Beban Nonlinier

Beban non linear adalah beban yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansinya yang tidak konstan, maka arus yang dihasilkan tidaklah berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sehingga beban non linear tidaklah mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan arus

berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban nonlinear tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat (distorsi). contoh beban non linear salah satunya inverter, motor induksi, televisi dengan monitor LED, komputer/laptop, kipas angin, air conditioner (AC), printer, lampu hemat energi, frequency converter dll.(Sudibya & Irawaty, 2018). Dari gambar 2.2 gelombang arus dan tegangan beban non linier.



Gambar 2.2 Gelombang Arus Dan Tegangan Beban Non Linier
(Sudibya & Irawaty, 2018)

2.2 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. (Ilmi, 2019)

Adapun untuk tegangan listrik pada umumnya menggunakan rumus (2.4) atau (2.5).

$$V = R \times I \quad (2.4)$$

Atau

$$V = \frac{P}{I} \quad (2.5)$$

Keterangan

V = Beda Potensial atau Tegangan Listrik (volt)

I = Arus Listrik (amper)

R= Hambatan (ohm)

P = daya listrik

2.3 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. Muatan listrik pada dasarnya dibawa oleh Elektron dan Proton di dalam sebuah atom. Proton memiliki muatan positif, sedangkan Elektron memiliki muatan negatif. Namun, Proton sebagian besar hanya bergerak di dalam inti atom. untuk membawa muatan dari satu tempat ke tempat lainnya ini ditangani oleh Elektron.

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”. dalam Hukum Ohm menyatakan bahwa besarnya Arus Listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor adalah berbanding lurus dengan beda potensial atau Tegangan (V) dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R).

Adapun untuk tegangan listrik pada umumnya menggunakan rumus (2.6) atau (2.7).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.6)$$

Atau

$$I = \frac{P}{V} \quad (2.7)$$

Keterangan :

I = arus listrik (amper)

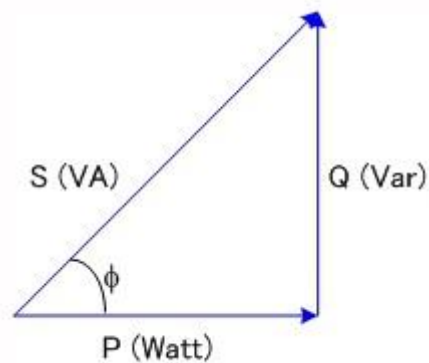
V = Beda potensial atau tegangn listrik (volt)

R = Hambatan (ohm)

2.4 Daya Listrik

Daya listrik adalah jumlah besar listrik yang dapat diserap dalam sebuah rangkaian listrik. Satuan daya listrik adalah watt, yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik). Dalam rangkaian arus searah besarnya daya yang diserap dalam suatu beban listrik ditentukan oleh nilai tahanan beban serta besar arus yang mengalir pada beban tersebut.

Daya dalam sistem tenaga listrik arus bolak balik atau (AC) di kenal dengan 3 macam yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Hubungan ke 3 macam daya tersebut di gambarkan dengan segitiga daya.



Gambar 2. 3 Segitiga Daya

Dapat di lihat pada gambar 2. 3 , daya aktif berada di garis lurus ke kanan, daya reaktif di garis lurus ke atas, dan daya semu adalah sisi miring, bagian dari garis pythagoras yang terdiri dari susunan antara daya aktif dan daya reaktif

2.4.1 Daya aktif

Satuan daya aktif adalah watt (W), daya ini diartikan sebagai nilai daya real yang dikonsumsi dan dibutuhkan oleh beban. Pada daya aktif, energi yang mengalir akan dikonversikan oleh beban menjadi bentuk energi lainnya, dengan persamaan (2.8) dan (2.9)

Untuk satu fasa

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.8)$$

Untuk tiga fasa

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (2.9)$$

Keterangan :

P= daya aktif (watt)

V= Tegangan (volt)

I = arus (amper)

$\cos \varphi$ = Factor daya

2.4.2 Daya reaktif

Menurut (Meier, 2006) Daya reaktif merupakan jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar dan lain – lain. Daya reaktif memiliki satuan berupa volt ampere reactive (VAR). Persamaan (2.10) dan (2.11) merupakan persamaan daya reaktif

Untuk satu fasa :

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (2.10)$$

Untuk tiga fasa :

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \quad (2.11)$$

Keterangan

Q= Daya reaktif (VAR)

V= Tegangan (Volt)

I = Arus (amper)

$\sin \varphi$ = Faktor reaktif

2.4.3 Daya semu

Daya Semu merupakan daya yang di peroleh dari perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan, atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Daya semu adalah daya yang dikeluarkan sumber alternation current (AC) atau di serap oleh beban. Satuan dari daya semu yaitu volt ampere (VA). (Meier, 2006) berikut persamaan (2.12) dan (2.13) untuk daya semu :

Untuk satu fasa

$$S = V \times I \quad (2.12)$$

Untuk tiga fasa

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \quad (2.13)$$

2.5 Faktor Daya

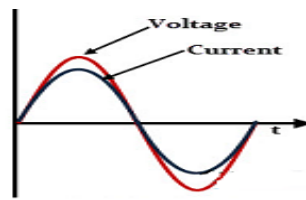
Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Faktor daya atau faktor kerja menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Daya aktif digunakan untuk mengoperasikan beban-beban pada pelanggan listrik. Daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit yang ditransmisikan ke pelanggan listrik. Daya reaktif yang bertambah akan menyebabkan turunnya faktor daya listrik. Cara yang mudah untuk mengantisipasi turunnya faktor daya listrik dapat dilakukan dengan memilih beban-beban yang mempunyai faktor daya besar juga dapat dilakukan dengan memasang kapasitor(Sankaran, 2002).

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*) yang ditentukan oleh jenis beban pada sistem tenaga listrik.(Farhany, 2016)

2.5.1Faktor daya unity

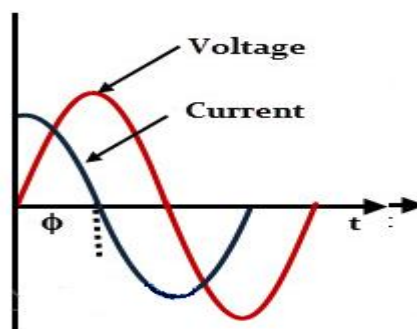
Faktor daya unity merupakan keadaan ketika nilai $\cos \varphi$ adalah satu dan tegangan sefasa dengan arus. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.(Farhany, 2016). Dilihat pada Gambar 2.3 merupakan gelombang faktor daya *unity*



Gambar 2. 4 Gelombang Faktor Daya Unity
(Purwadi, 2019)

2.5.2 Faktor daya leading

Faktor daya mendahului (*leading*) merupakan 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 . Apabila arus mendahului tegangan maka faktor daya ini dikatakan “*leading*”. (Farhany, 2016). Dapat dilihat Gambar 2.5 Gelombang arus mendahului tegangan



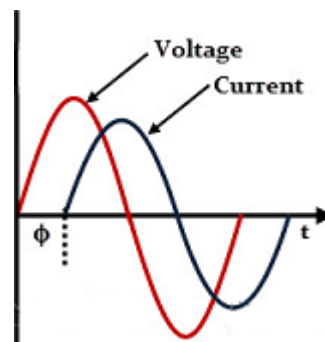
Gambar 2. 5 Gelombang Faktor Daya Leading
(Purwadi, 2019)

Gambar 2. 5 merupakan gelombang arus mendahului tegangan, dimana kondisi beban memberikan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat kapasitif

2.5.3 Faktor daya lagging

Faktor daya tertinggal (*lagging*) merupakan keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari

sistem atau beban bersifat induktif dan keadaan dimana fase tegangan mendahului arus sebesar sudut ϕ maka faktor daya ini dikatakan “*lagging*”.(Farhany, 2016). Dapat dilihat pada gambar 2.6 merupakan gambar vektor arus tertinggal dari tegangan dan pada Gambar 2.5 Gelombang faktor daya lagging.



Gambar 2. 6 Gelombang Faktor Daya Lagging
(Purwadi, 2019)

Gambar 2. 6 merupakan gelombang tegangan mendahului arus, dimana kondisi beban memerlukan daya reaktif pada sistem atau beban bersifat induktif

2.6 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan.(Zein, 2022). Satuan frekuensi dinyatakan dalam hertz (Hz) di ambil dari nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T).dinyatakan dalam persamaan (2.14)

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.14)$$

Keterangan :

F = Frekuensi (Hz)

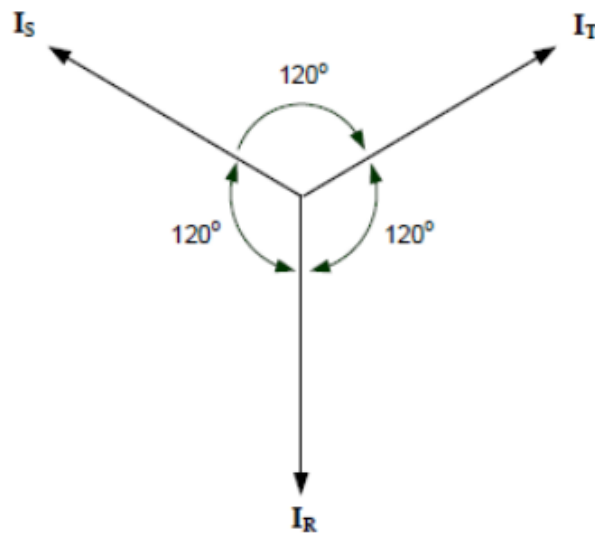
T = periode (detik)

Dalam setiap negara memiliki frekuensi yang berbeda, sebagai contoh frekuensi yang digunakan di Amerika yaitu 60 Hz, sedangkan frekuensi yang berlaku di Indonesia yaitu 50 Hz.

2.7 Ketidakseimbangan Beban dan Tegangan

Ketidakseimbangan beban sistem tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncul arus di netral. Arus yang mengalir di netral ini menyebabkan terjadinya losses (rugi-rugi), yaitu losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Menurut (Mertasana, 2016) Beban dinyatakan seimbang apabila :

- Ketiga vektor arus/tegangan adalah sama besar
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti terlihat pada Gambar dibawah ini



Gambar 2. 7 Vektor Beban Seimbang
(Anwar, 2021)

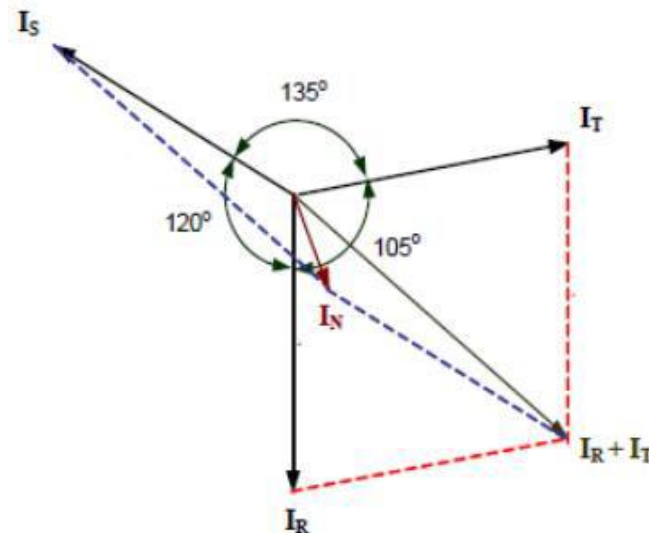
Pada Gambar 2. 7 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (Anwar, 2021). Dalam keadaan ideal, transformator 3 fasa akan mempunyai nilai yang sama pada tiap fasanya, yang berbeda hanyalah sudut fasanya yaitu harus 120° . Namun pada penerapannya, keadaan ideal tersebut sangat sulit terjadi dikarenakan tiap fasa pada sisi sekunder akan menyalurkan daya tiap fasa dengan beban yang berbeda tiap fasanya. Hal ini akan menyebabkan beban tidak seimbang pada masing-masing fasanya. Efek dari ketidakseimbangan fasa tersebut adalah akan timbul arus netral (Pramon, 2021).

Menurut (Anwar, 2021) yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang yaitu keadaan dimana salah satu atau keadaan satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan 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.

terlihat pada Gambar 2.8 :



Gambar 2. 8 Vector Beban Tak Seimbang (Anwar, 2021)

Pada Gambar 2. 8 menunjukkan arus yang tidak seimbang. terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya tergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangan.(Nugraha et al., 2022). Persamaan (2.15) untuk menghitung nilai rata rata pada suatu beban atau tegangan.

$$X_{rata-rata} = \frac{X_R + X_S + X_T}{3} \quad (2.15)$$

Keterangan

$X_{rata - rata}$ = Arus/Tegangan rata rata

X_R = Arus/Tegangan phase R

X_S = Arus/Tegangan phase S

$$X_T = \text{Arus/Tegangan phase T}$$

$$X_R = a \times \text{Arus/Tegangan rata-rata}$$

$$X_S = b \times \text{Arus/Tegangan rata-rata}$$

$$X_T = c \times \text{Arus/Tegangan rata-rata}$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b, dan c adalah 1. Sehingga di dapat persamaan (2.16) untuk ketidakseimbangan beban atau tegangan (dalam %) :

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.16)$$

Berdasarkan standar (IEEE Std 446-1987) tentang batasan ketidakseimbangan beban yaitu 5% sampai dengan 20% , dapat dilihat pada tabel 2. 1

Tabel 2. 1 standar ketidakseimbangan beban dan tegangan (IEE Std 446-1987)

Parameters	Range or Maximum
1) 3 ϕ , phase voltage unbalance	2.5 to 5%
2) 3 ϕ , load unbalance	5 to 20% maximum for any one phase

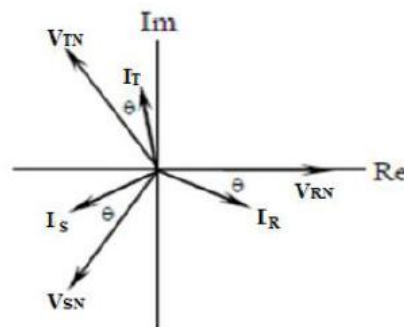
Ketidakseimbangan tegangan (*voltage imbalance* atau *unbalance*) didefinisikan sebagai penyimpangan atau deviasi maksimum dari nilai rata-rata tegangan sistem tiga fasa tegangan atau arus listrik, dibagi dengan nilai rata-rata tegangan tiga fasa atau arus tersebut, dan dinyatakan dalam persen. untuk Ketidak seimbangan tegangan dapat di lihat pada persamaan (2.16)

Berdasarkan standar (IEEE Std 446-1987) Besarnya ketidakseimbangan tegangan pada sumber utama tidak boleh lebih dari 2,5%. Nilai kritis dari keadaan

ketidakseimbangan tegangan adalah jika nilai persentase perbandingannya melebihi 5%, hal ini biasanya terjadi karena terputusnya salah satu fasa dari sistem tenaga listrik tiga fasa.

2.8 Arus netral

Arus netral dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah 3 fasa 4 kawat. Arus netral ini akan muncul jika kondisi beban tidak seimbang atau karena adanya arus harmonisa akibat dari beban non linear yang semakin berkembang digunakan saat ini. Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus balik untuk sistem distribusi 3 fasa 4 kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. (Dwipayana et al., 2017)



Gambar 2. 9 Fasor Tegangan dan Arus Terhubung Bintang (Dwipayana et al., 2017)

Pada gambar 2. 9 menunjukkan diagram fasor tegangan dan arus dengan sudut θ , jika diagram fasor tersebut dikatakan seimbang dalam arti $\theta = 120^\circ$ maka:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.18)$$

Arus netral yang ideal bernilai 0 karena arus netral diperoleh dari penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa. Maka rumus arus netral adalah:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.19)$$

Arus netral yang tinggi dapat mempengaruhi sistem, berikut ini merupakan pengaruh yang dapat disebabkan oleh arus netral yaitu timbulnya panas berlebih pada transformator, menurunnya kualitas daya (Dwipayana et al., 2017).

Arus beban tiga fasa dari suatu sistem tidak seimbang dapat diselesaikan menggunakan metode komponen simetris. Tiga fasor tak seimbang dari dapat diuraikan menjadi tiga fasor seimbang. Persamaan (2.20) (2.21) dan (2.22) untuk menghitung arus perfasenya :

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.20)$$

$$I_S = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2.21)$$

$$I_T = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (2.22)$$

Untuk persamaan (2.20) (2.21) (2.22) dapat di rubah dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

Dengan langkah yang telah diuraikan di atas terkait arus-arus urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol, maka akan didapatkan persamaan (2.23) (2.24) (2.25)

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_R + a I_S + a^2 I_T) \quad (2.23)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_R + a^2 I_S + a I_T) \quad (2.24)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_R + I_S + I_T) \quad (2.25)$$

Dapat di rubah dalam bentuk matriks yaitu

$$\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3I_1 \\ 3I_2 \\ 3I_0 \end{bmatrix}$$

Dilihat bahwa arus urutan I_0 merupakan sepertiga dari arus netral, maka bisa di peroleh persamaan (2.26) arus netral terhadap arus urutan nol

$$I_N = 3I_0 \quad (2.26)$$

2.9 Komponen simetris

Pada tahun 1918, C.L. Fortesque menemukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa sistem 3 fase yang tidak seimbang. Ketidakseimbangan dapat didefinisikan menggunakan komponen simetris. Pada sistem tiga fase empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fase dalam komponen simetris. Satu kesatuan tiga fasor tegangan tak seimbang dari sistem tiga fase dapat diuraikan menjadi tiga fase yang seimbang. (Prapto, 2016). komponen simetris tersebut yaitu urutan positif, urutan negatif dan urutan nol.

1. Komponen urutan positif

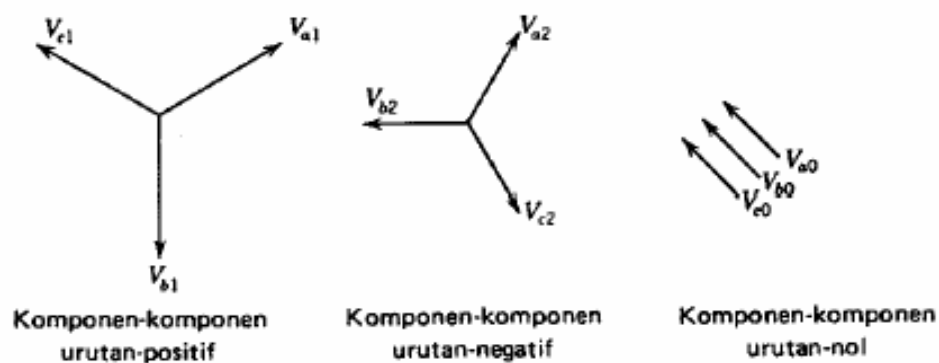
Komponen urutan positif adalah yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya searah dengan jarum jam atau *Clockwise* dalam beda fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya (R, S, T). (Prapto, 2016). Dapat dilihat pada Gambar 2.7 merupakan fasor urutan positif.

2. Komponen urutan negatif

menurut (Prapto, 2016) Komponen urutan negatif adalah tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya berlawanan arah jarum jam atau *counterclockwise* dalam beda fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan arah dengan fasor aslinya (RTS). dapat dilihat pada gambar 2.7 yang merupakan fasor komponen negatif.

3. Komponen urutan nol

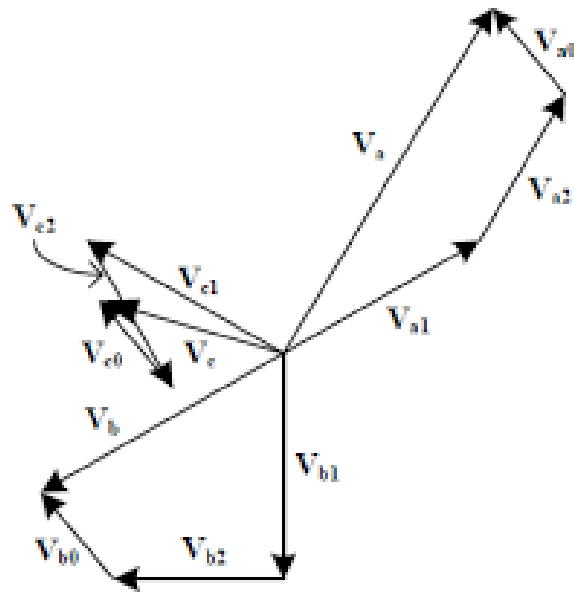
Komponen urutan nol adalah tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lainnya (Prapto, 2016). Dapat dilihat pada Gambar 2. 7



Gambar 2. 10 Pasor komponen simetris urutan positif, negatif dan nol
(Prapto, 2016)

Pemecahan masalah dengan menggunakan komponen simetris, ketiga fasa dinyatakan dengan a, b, c sehingga urutan fasa tegangan dan arus yaitu abc. Maka urutan fasa komponen positif adalah abc dan urutan fasa komponen negatif adalah acb. Apabila fasor aslinya merupakan tegangan maka tegangan tersebut dapat dinyatakan V_a , V_b , dan V_c . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif dan 0 untuk urutan nol. Untuk komponen urutan positif dari V_a , V_b , dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} , V_{c1} . Untuk komponen urutan negatif yaitu V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} , sedangkan untuk komponen urutan negatif yaitu V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} . (Nugraha et al., 2022)

Komponen-komponen ini dijumlahkan secara grafis maka diperoleh tiga fasor tak seimbang. Dapat dilihat pada gambar 2.8



Gambar 2. 11 Penjumlahan secara grafis komponen urutan positif, negatif, nol

Penjumlahan semua vektor dapat dinyatakan dengan persamaan

Tegangan fasa a :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.27)$$

Tegangan fasa b :

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.28)$$

Tegangan fasa c :

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.29)$$

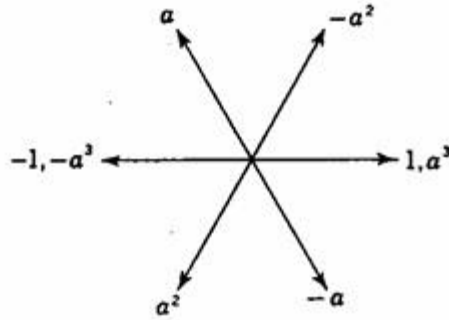
pada persamaan di atas terdapat simbol huruf a yang merupakan oprator suatu putaran sebesar 120° dengan arah yang berlawanan dengan putaran jarum jam.

Oprator ini merupakan bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° di definisikan sebagai

$$a = 1 \angle 120^\circ \text{ atau } a = -0,5 + j0,866$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ \text{ atau } a^2 = -0,5 - j0,866$$

dapat dilihat pada gambar 2. 9 Fasor berbagai pangkat dari a



Gambar 2. 12 fasor berbagai pangkat dari a

Telah di sebutkan bahwa tiga pasor asimetris dapat di representasikan menjadi tiga buah fasor simetris dengan persamaan (2.26) (2.28) (2.29) Dengan menggunakan himpunan Fasor dari komponen komponen simetris maka dapat di ketahui.

$$V_{b0} = V_{c0} = V_{a0}$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

Atau dalam bentuk matriks

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{b1} \\ V_{c2} \end{pmatrix}$$

Utuk lebih sederhana didapat

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \text{ dan } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix}$$

Sehingga diperoleh matriks

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{b1} \\ V_{c2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Dengan langkah yang telah diuraikan di atas maka didapat persamaan

$$Va_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (2.30)$$

$$Va_1 = \frac{1}{3} (Va + aV_b + a^2V_c) \quad (2.31)$$

$$Va_2 = \frac{1}{3} (Va + a^2V_b + aV_c) \quad (2.32)$$

Pada persamaan (2.30) (2.31) (2.32) berlaku juga untuk menentukan komponen arus

2.10 Penelitian terkait

Berdasarkan studi tentang ketidakseimbangan beban sudah ada banyak dilakukan. Beberapa penelitian yang signifikan dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 2 Penelitian terkait

NO	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Analisis Keseimbangan Beban dan Harmonisa Di Gedung Graha Polinema	Ahmad Hermawan, Mudjiono, Chandra wiharya, siffa seftiana	Gedung Graha Polinema, málaga, 2021	Penelitian ini membahas Keseimbangan beban yang besar diakibatkan penggunaan beban listrik 1 fasa pada sistem 3 fasa dan Harmonisa yang jelek disebabkan oleh beban beban yang non linier akan menyebabkan rugi rugi pada jaringan

				yang menyebabkan kualitas distribusi tenaga listrik yang buruk.
2	Analisis keseimbangan beban di gedung ICT Universitas Diponegoro	Rita Devi Rahmawati, Bambang Winardi, Ajub Ajulian zahra	Gedung ICT Universitas Diponegoro, 2021	Penelitian ini membahas ketidakseimbangan beban dengan pengukuran menggunakan Power Quality Analyzer dan tangampere pada SDP lantai 1 dengan arus netral sebesar 5,8 A. Melakukan analisis mengenai keseimbangan beban menggunakan software bantu ETAP 12.6
3	Analisis Penyeimbangan Beban Pada Transformator Di Fakultas Pertanian Universitas Siliwangi	Asep Tri Mulyana Nugraha, Sutisna, Asep Andang, Muhammad Aris Risnandar	Universitas Siliwangi 2022	Menganalisis pembebanan yang ada pada transformator di Fakultas Pertanian Universitas Siliwangi dan melakukan penyeimbangan pembebanan yang bisa mereduksi arus netral dan rugi-rugi daya
4	Analisis Ketidakseimbangan Beban Instalasi Listrik Di Fakultas Teknik Universitas Udayana	Kosmas Damianus Tambi, I N. Setiawan, I N. Budiastra	Universitas udayana Bali. 2017	Menganalisa ketidakseimbangan beban di fakultas teknik yang disebabkan oleh pembebanan yang tidak merata mengakibatkan munculnya arus netral. Penelitian ini dilakukan dengan menghitung rugi-rugi

				daya beban seimbang dan beban tidak seimbang pada waktu malam hari di kampus Fakultas Teknik Universitas Udayana Jalan PB.Sudirman Denfasar.
5	Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap efesiensi listrik dalam rangka konservasi energi di gedung rektorat UIN suska Riau	Liliana	UIN Suska Riau, 2012	Penelitian ini membahas kerugian daya aktif yang ditimbulkan oleh arus pada kawat netral transformator akibat ketidakseimbangan beban di gedung Rektorat UIN Suska Riau. Pengukuran arus, tegangan, daya dan faktor daya dilakukan pada pagi, siang dan sore hari untuk diketahui berapa besar ketidakseimbangan arus fasa yang terjadi sehingga berpotensi meningkatkannya arus pada kawat netral transformator.
6	Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon	Zulfikar Rumakat,Dini Fauziah	Rayon Baguala Ambon, 2021	Penelitian ini membahas ketidak seimbangan beban yang di akitbat kan meningkatnya pembangunan sehingga kebutuhan energi listrik semakin meningkat,peningkat tersebut tidak di barengi dengan penyeimbangan tiap

				bebanya, sehingga terjadi ketidakseimbangan beban yang menimbulkan munculnya arus netral yang dapat mengakibatkan rugi rugi meningkat. Dengan arus Netral 23,1 dan rugi rugi sebesar 391,1 watt
7	Rugi daya akibat ketidakseimbangan beban terhadap arus netral pada transformator distribusi	Eri Suherman, Sopyan Putra Kampay	PT. PLN (persero) rayon Bantar Gebang, 2017	Dalam penelitian ini lima transformator yang dianalisis empat transformator dalam keadaan tidak seimbang dan 1 transformator dalam keadaan seimbang. Standarisasi yang digunakan yaitu SPLN D3.002-1 2007
8	Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada transformator distribusi di PT. PLN (persero) area Sorong	Markus Dwiyanto Tobi Sogen	PT PLN (persero) Sorong, 2018	Penelitian ini menggunakan metode perbandingan dengan cara mengukur beban pada saat sebelum dilakukan penyeimbangan beban dan dibandingkan dengan pada saat sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Penyeimbangan beban dilakukan dengan cara memindahkan sebagian beban di fasa yang

				berbeban tinggi ke fasa yang berbeban lebih rendah sehingga dihasilkan beban fasa yang seimbang.
9	Ketidakseimbangan beban terhadap arus netral di gedung E11 dan Gedung Dekanat fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang	Yoana Anestia Pradita	Universitas Negeri Semarang, 2019	penelitian ini mengidentifikasi besarnya nilai ketidakseimbangan beban dan nilai arus kawat netral yang terjadi pada gedung E11 dan gedung Dekanat Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Metode yang digunakan yaitu metode statistik deskriptif kuantitatif. Penelitian dilakukan pada pukul 07.00; 09.00; 11.00; 13.00; 16.00 wib dengan pengambilan tiga kali sampel penelitian tiap waktunya
10	Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada transformator distribusi KA0562 pada penyulang umalas mengwi Badung	Putu Arya Mertasana	PT. PLN (persero) Rayon Mengwi Badung Bali, 2016	Penelitian ini membahas pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada trafo distribusi, pada penelitian ini nilai ketidakseimbangan beban yang di dapat sebesar 37.66% dan setelah di lakukan penyeimbangan beban di dapat nilai sebesar 12,33%

Dilihat pada tabel 2.1 terdapat beberapa perbedaan dengan penelitian ini diantaranya tempat penelitian, waktu pengukuran, alat yang di gunakan. Banyak penelitian sebelumnya pada Pengukuran tidak dilakukan selama 24 jam. Pada perhitungan menggunakan cosh phi yang di sarankan PLN. Sedangkan pada penelitian ini pengukuran di lakukan selama 14 hari 24 jam dengan interval waktu 1 jam,dan cosh phi yang di gunakan sesuai dengan nilai yang ada di lapangan.