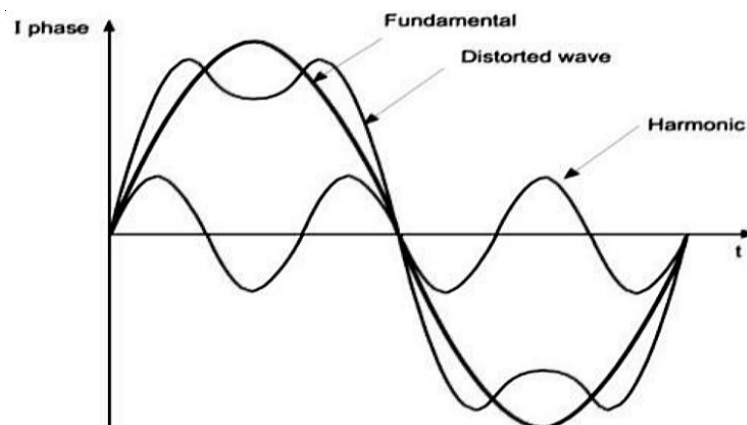


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Harmonisa

Harmonisa merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik akibat adanya distorsi pada gelombang arus dan tegangan. Secara prinsip, harmonisa terjadi ketika terbentuknya gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental sistem. Sebagai contoh, jika suatu sistem tenaga listrik memiliki frekuensi dasar sebesar 50 Hz, maka harmonisa orde kedua memiliki frekuensi 100 Hz, harmonisa orde ketiga 150 Hz, dan seterusnya. Gelombang harmonisa ini akan menumpang pada gelombang asli, sehingga membentuk gelombang yang terdistorsi atau tidak murni, yang merupakan hasil penjumlahan antara gelombang dasar dan harmoniknya (Sutjipto & Wijaya Kusuma, 2022).



Gambar 2.1 Gelombang Fundamental, Gelombang Harmonisa, dan Gelombang Terdistorsi (Samiaji et al., 2024)

2.1.1 *Total Harmonic Distortion (THD)*

Total Harmonic Distortion atau bisa disingkat menjadi THD adalah rasio antara nilai RMS dari seluruh komponen harmonisa dan nilai RMS dari komponen

fundamentalnya. THD dapat diterapkan baik pada tegangan maupun arus dalam suatu sistem kelistrikan (Dwipayana et al., 2017).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

Keterangan:

THD_V = total harmonic distortion tegangan

THD_I = total harmonic distortion arus

V_n = nilai tegangan harmonisa ke-n

I_n = nilai arus harmonisa ke-n

V_1 = nilai tegangan fundamental

I_1 = nilai arus fundamental

2.1.2 Standar Harmonisa

Standar harmonisa mengacu pada IEEE 519-2014 mengatur mengenai regulasi harmonisa yang menetapkan batas maksimum distorsi harmonisa tegangan dan arus. Di bawah ini merupakan tabel batasan THD tegangan dan arus.

Tabel 2.1 Standar Distorsi Harmonisa Tegangan
(IEEE 519-2014)

Bus voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Tabel 2.2 Standar Distorsi Harmonisa Arus
(IEEE 519-2014)

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.1.3 Jenis Harmonisa

Terdapat empat jenis harmonisa dalam sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Harmonisa ganjil, yaitu komponen frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan ganjil dari frekuensi fundamental.
2. Harmonisa genap, yaitu komponen frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan genap dari frekuensi dasar. Kondisi ini biasanya muncul akibat bentuk gelombang yang tidak simetris terhadap sumbu waktu, seringkali disebabkan oleh adanya komponen arus atau tegangan searah (DC) pada sumber atau beban.
3. Interharmonisa, yaitu komponen frekuensi yang nilainya bukan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental.
4. Subharmonisa, yaitu komponen frekuensi yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan frekuensi fundamental.

2.1.4 Urutan Polaritas Harmonisa

Setiap komponen harmonisa dalam sistem tenaga tiga fasa memiliki urutan polaritas yang menentukan arah rotasi fasor harmonisnya terhadap sistem fasa dasar. Urutan polaritas ini dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Urutan Positif

Harmonisa dengan urutan positif memiliki arah rotasi yang sama dengan urutan fasa sistem, yaitu R–S–T. Contohnya adalah harmonisa orde pertama (frekuensi fundamental), orde keempat, ketujuh, dan seterusnya mengikuti kelipatan pola.

2. Urutan Negatif

Harmonisa ini memiliki arah rotasi berlawanan dengan urutan fasa sistem. Contohnya adalah harmonisa orde kedua, kelima, kedelapan, dan seterusnya.

3. Urutan Nol (*Zero Sequence*)

Harmonisa dengan urutan nol tidak memiliki urutan rotasi, artinya ketiga fasanya berada dalam fasa yang sama. Contohnya adalah harmonisa orde ketiga, keenam, kesembilan, dan kelipatan tiganya.

Urutan polaritas harmonisa ini bersifat berulang, dimulai dari harmonisa pertama yang positif, harmonisa kedua negatif, harmonisa ketiga nol, lalu pola tersebut kembali berulang di harmonisa keempat, kelima, keenam, dan seterusnya.

Tabel 2.3 Urutan Polaritas Harmonisa

Orde Harmonisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frekuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Urutan/Polaritas	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2.1.5 Harmonisa Triplen

Harmonisa dengan orde kelipatan tiga seperti orde ke-3, ke-9, dan ke-15, memiliki karakteristik sebagai komponen *zero sequence*, di mana ketiganya memiliki sudut fasa yang sama pada setiap fasa. Karena sudut fasa yang identik ini, harmonisa triplen cenderung tidak saling meniadakan di penghantar netral, melainkan justru saling menguatkan dan menyebabkan arus netral yang signifikan, terutama pada sistem dengan beban nonlinier. Dalam sistem distribusi tiga fasa empat kawat, meskipun kondisi beban seimbang, harmonisa triplen dari ketiga fasa justru akan saling menumpuk di penghantar netral karena tidak mengalami pergeseran sudut fasa satu sama lain. Akumulasi ini dapat menyebabkan arus netral yang signifikan bahkan ketika arus fundamental antar fasa terdistribusi merata. Hal ini ditegaskan dalam sumber dari *Electrical Engineering Portal* yang menyatakan bahwa "*triplen harmonic current flow applies even under balanced loading conditions*" (*Electrical Engineering Portal*, 2020). Selain itu, *Power Quality Blog* juga menyebutkan bahwa "*Triple-N harmonic currents add arithmetically in the neutral conductor*" (*Power Quality Blog*, 2021), memperkuat bukti bahwa harmonisa triplen memberikan kontribusi signifikan terhadap arus netral walaupun sistem tampak seimbang secara fundamental.

2.2 Besaran Dasar Listrik

Dalam teknik tenaga listrik, terdapat tiga besaran utama yang menjadi dasar analisis sistem kelistrikan, yaitu beda potensial yang lebih dikenal sebagai tegangan listrik, arus listrik, dan frekuensi. Ketiga besaran ini memiliki peran penting dan saling berkaitan. Selain itu, terdapat besaran lain yang juga berperan signifikan dalam kajian sistem tenaga listrik, yaitu daya dan faktor daya (Zein, 2022).

2.2.1 Tegangan Listrik

Tegangan listrik merupakan jumlah energi yang diperlukan untuk memindahkan satu unit muatan listrik dari satu titik ke titik lainnya. Tegangan listrik, yang dinyatakan dalam satuan volt, juga dikenal sebagai 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 dibandingkan benda lain jika mengandung lebih banyak muatan positif. Sementara itu, potensial listrik sendiri merujuk pada jumlah muatan yang terdapat dalam suatu benda (Hermawan et al., 2021).

Tegangan listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$V = I \times R \quad (2.3)$$

Keterangan:

V = beda potensial atau tegangan listrik (volt)

I = arus listrik (ampere)

R = hambatan listrik (ohm)

2.2.2 Arus Listrik

Arus listrik, atau dalam bahasa Inggris disebut *electric current*, merupakan aliran muatan listrik yang bergerak melalui media konduktor dalam setiap satuan waktu. Secara prinsip, muatan listrik dibawa oleh partikel sub atom, yaitu elektron dan proton. Proton memiliki muatan positif, sedangkan elektron bermuatan negatif. Namun, karena proton umumnya tetap berada di dalam inti atom, pergerakan muatan listrik dari satu titik ke titik lainnya dilakukan oleh elektron (Ilmi, 2019).

Arus listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.4)$$

Keterangan:

I = arus listrik (ampere)

V = beda potensial atau tegangan listrik (volt)

R = hambatan listrik (ohm)

2.2.3 Daya Listrik

Daya listrik, atau dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *electrical power*, merupakan besarnya energi yang digunakan atau dihasilkan dalam suatu rangkaian listrik. Tegangan listrik sebagai sumber energi akan menghasilkan daya, sementara beban yang terhubung ke rangkaian tersebut akan menyerapnya. Secara sederhana, daya listrik menggambarkan laju pemakaian energi dalam suatu sistem kelistrikan (Ilmi, 2019).

Daya listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$P = V \times I \quad (2.5)$$

Keterangan:

P = daya listrik (watt)

V = tegangan listrik (volt)

I = arus listrik (ampere)

2.2.4 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik dalam sistem kelistrikan umumnya menggunakan listrik bolak-balik (AC) dengan bentuk gelombang sinusoidal. Gelombang tegangan dan arus sinusoidal bersifat periodik, sehingga memiliki frekuensi.

Frekuensi sendiri merupakan ukuran yang menunjukkan seberapa sering suatu gelombang berulang dalam rentang waktu tertentu (Zein, 2022).

Satuan frekuensi dinyatakan dalam hertz (Hz) diambil dari nama seorang pakar fisika berkebangsaan Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang pertama kali menemukan fenomena ini.

Untuk rumus frekuensi dapat dihitung dengan:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.6)$$

Keterangan:

f = frekuensi (hertz)

T = periode (detik)

2.2.5 Faktor Daya

Faktor daya, yang juga dikenal sebagai faktor kerja, merupakan perbandingan antara daya nyata atau daya aktif, yang dilambangkan dengan P dan memiliki satuan watt, dengan daya semu, yang disimbolkan sebagai S dan dinyatakan dalam volt ampere (VA). Semakin tinggi nilai faktor daya, maka efisiensi penggunaan peralatan listrik akan semakin optimal. Sebaliknya, faktor daya yang rendah dapat menyebabkan penurunan efektivitas kinerja peralatan listrik (Zein, 2022).

Faktor daya ini dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$\cos \varphi$ = faktor daya

P = daya nyata (watt)

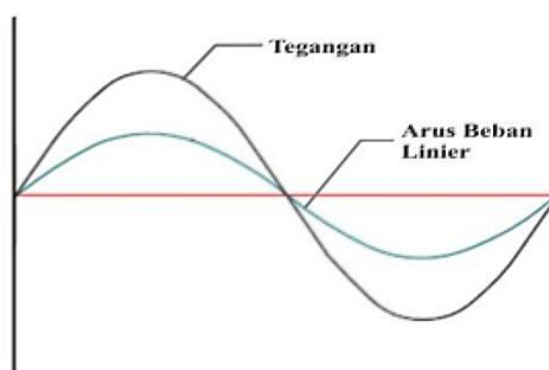
S = daya semu (VA)

2.3 Beban Listrik

Beban listrik adalah komponen atau perangkat dalam suatu rangkaian listrik yang berfungsi mengonsumsi energi listrik (daya) dan mengonversinya ke bentuk energi lain. Oleh karena itu, ukuran dan perubahan beban listrik bergantung pada kebutuhan tenaga listrik yang digunakan (Saifuddin et al., 2018).

2.3.1 Beban Linier

Beban linier merupakan jenis beban yang memiliki impedansi tetap, sehingga arus yang mengalir selalu sebanding dengan tegangan setiap saat. Beban ini mengikuti Hukum Ohm, yang menyatakan bahwa arus sebanding dengan tegangan yang diberikan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier memiliki bentuk yang sama dengan gelombang tegangannya. Jika diberikan tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir juga berbentuk sinusoidal, sehingga tidak menyebabkan distorsi maupun harmonisa. Beban linier umumnya terdiri dari elemen pasif seperti resistor, induktor, dan kapasitor. Contoh lainnya meliputi lampu pijar, pemanas, dan resistor (Sudibya & Irawaty, 2018).



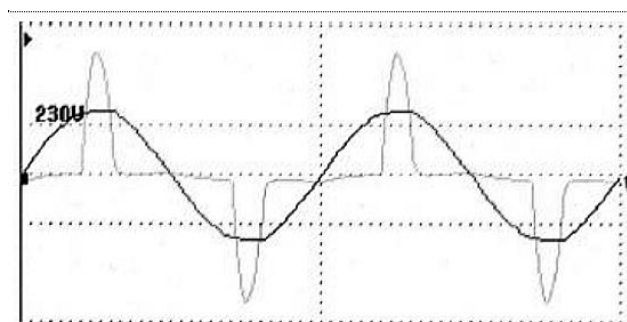
Gambar 2.2 Gelombang Arus dan Gelombang Tegangan Beban Linier (Sudibya & Irawaty, 2018)

2.3.2 Beban Nonlinier

Beban nonlinier merupakan jenis beban yang memiliki impedansi yang berubah-ubah selama setiap periode tegangan masukan. Akibat impedansinya yang

tidak konstan, arus yang dihasilkan tidak selalu sebanding dengan tegangan yang diberikan, sehingga tidak mengikuti Hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban non-linier berbeda dari bentuk gelombang tegangan, yang menyebabkan terjadinya distorsi atau cacat gelombang. Dengan semakin banyaknya penggunaan beban non-linier, gelombang sinusoidal dalam sistem kelistrikan dapat mengalami distorsi. Beberapa contoh beban nonlinier yang umum digunakan dalam rumah tangga maupun industri meliputi peralatan dengan busur api listrik, konverter elektronik, transformator *ballast* magnetik, motor induksi, *charger ballast* elektronik (Sudibya & Irawaty, 2018).

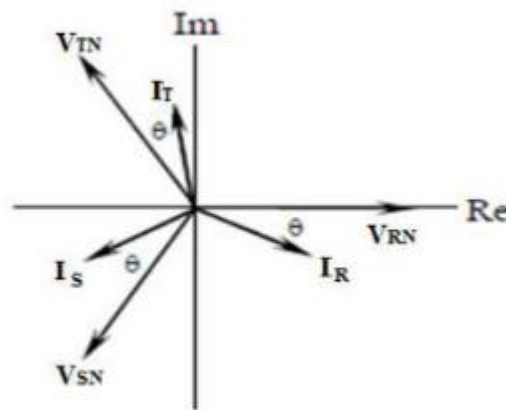
Beban nonlinier tidak hanya menyebabkan distorsi bentuk gelombang, tetapi juga dapat memengaruhi sudut fasa antara arus dan tegangan meskipun dalam kondisi seimbang. Hal ini terjadi karena adanya harmonisa yang dihasilkan dari karakteristik *switching* beban. Salah satu penelitian menunjukkan bahwa pada sistem tiga fasa tanpa netral, sudut fasa arus dapat bergeser sekitar $-0,15$ radian terhadap tegangannya, meskipun nilai beban seimbang. Fenomena pergeseran sudut ini tetap bisa terjadi pada sistem lain akibat pengaruh harmonisa dari beban nonlinier (Wcislik et al., 2024).



Gambar 2.3 Gelombang Arus dan Gelombang Tegangan Beban Nonlinier (Sudibya & Irawaty, 2018)

2.4 Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi adalah arus yang mengalir melalui penghantar netral dengan konfigurasi hubungan bintang. Kemunculan arus ini dapat disebabkan oleh ketidakseimbangan beban atau adanya harmonisa yang timbul akibat penggunaan beban nonlinier. Gelombang arus yang mengalir pada penghantar netral sering kali dipengaruhi oleh harmonisa dengan frekuensi kelipatan tiga, yang dikenal sebagai *triplen harmonics*. Harmonisa ini terdiri dari kelipatan ganjil dari frekuensi dasar, dimulai dari harmonisa ketiga ($h = 3, 9, 15, 21$, dan seterusnya) (Malau et al., 2023).



Gambar 2.4 Diagram Fasor Tegangan dan Arus Konfigurasi Hubungan Bintang (Dwipayana et al., 2017)

Pada gambar 2.4 memperlihatkan diagram fasor tegangan dan arus dengan sudut fasa sebesar θ . Apabila diagram fasor tersebut berada dalam kondisi seimbangan, maka nilai sudut antar masing-masing fasor adalah sebesar 120° , maka:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.8)$$

Secara ideal, arus netral memiliki nilai nol karena merupakan hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa. Dengan demikian, arus netral dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.9)$$

Arus netral yang memiliki nilai tinggi dapat memberikan dampak terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Beberapa pengaruh yang ditimbulkan antara lain adalah terjadinya kenaikan suhu berlebih pada transformator serta penurunan kualitas daya listrik yang disalurkan (Dwipayana et al., 2017).

Ketidakeimbangan arus beban pada sistem tiga fasa dapat dianalisis menggunakan metode komponen simetris. Melalui metode ini, tiga fasor yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga kelompok fasor (Setiawan, 2018):

1. Komponen urutan positif terdiri atas tiga fasor yang memiliki amplitudo sama, dengan sudut fasa antar fasor sebesar 120° , serta mengikuti urutan fasa yang identik dengan sistem aslinya, yaitu R-S-T.
2. Komponen urutan negatif terdiri atas tiga fasor yang memiliki amplitudo sama, dengan sudut antar fasor sebesar 120° , namun dengan urutan fasa yang berlawanan terhadap sistem aslinya, yaitu mengikuti urutan R-T-S.
3. Komponen urutan nol terdiri atas tiga fasor yang memiliki amplitudo yang sama, dengan sudut fasa antar fasor sebesar 0° , sehingga ketiganya berada dalam fasa yang sama.

Dengan demikian, diperoleh persamaan-persamaan yang menyatakan arus pada masing-masing fasa sebagai berikut:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.10)$$

$$I_S = a_2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2.11)$$

$$I_T = a I_1 + a_2 I_2 + I_0 \quad (2.12)$$

Persamaan-persamaan tersebut selanjutnya dapat dinyatakan dalam bentuk matriks, yaitu sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_2 & a & 1 \\ a & a_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Berdasarkan tahapan yang telah dijelaskan mengenai arus-arus komponen urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol, maka diperoleh persamaan di bawah ini:

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_R + aI_S + a_2I_T) \quad (2.14)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_R + a_2I_S + aI_T) \quad (2.15)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) \quad (2.16)$$

Persamaan di atas dapat diubah ke dalam bentuk matriks yaitu:

$$\begin{bmatrix} 1 & a & a_2 \\ 1 & a_2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3I_1 \\ 3I_2 \\ 3I_0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai arus komponen urutan nol (I_0) merupakan sepertiga dari arus netral. Dengan demikian, persamaan yang menyatakan hubungan antara arus netral dan arus komponen urutan nol dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_N = 3I_0 \quad (2.18)$$

2.5 Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan merupakan kondisi di mana nilai tegangan atau sudut fasa pada setiap fasa dalam sistem tenaga listrik tidak sama. Sementara itu, ketidakseimbangan arus terjadi ketika arus yang mengalir pada masing-masing fasa memiliki nilai yang tidak seimbang. Perbedaan ini dapat menimbulkan arus pada penghantar netral, yang berpotensi menyebabkan rugi-rugi daya (*losses*) serta peningkatan suhu pada sistem. Faktor utama yang menyebabkan

ketidakseimbangan tegangan dan arus adalah distribusi beban yang tidak merata di setiap fasa (Wijaya et al., 2021).

Ketidakseimbangan tegangan (*voltage imbalance* atau *unbalance*) merupakan kondisi di mana terdapat penyimpangan terbesar dari nilai rata-rata tegangan atau arus dalam sistem listrik tiga fasa. Besarnya penyimpangan ini dihitung dengan membandingkan deviasi maksimum terhadap nilai rata-rata tegangan atau arus tiga fasa, lalu dinyatakan dalam bentuk persentase, nilai ketidakseimbangan tegangan dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan:

$$\%unbalance\ voltage = \frac{maximum\ voltage\ deviation\ average\ voltage}{average\ voltage} \times 100\% \quad (2.19)$$

Menurut ketentuan dalam IEEE Std 1159-2019, tingkat ketidakseimbangan tegangan pada sistem tenaga listrik tiga fasa sebaiknya tidak melebihi 2% dari nilai tegangan rata-rata antar fasa. Batas tersebut ditetapkan untuk mencegah dampak negatif pada peralatan listrik seperti motor induksi, yang sensitif terhadap ketidakseimbangan tegangan. Ketidakseimbangan yang melampaui nilai tersebut dapat menyebabkan peningkatan arus pada salah satu fasa, menghasilkan panas berlebih, serta mempercepat keausan pada komponen sistem. Meskipun dalam praktik toleransi kecil masih dapat diterima, tegangan yang tidak seimbang di atas ambang 2% harus segera ditangani guna menjaga kualitas daya dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

2.6 Ketidakseimbangan Beban

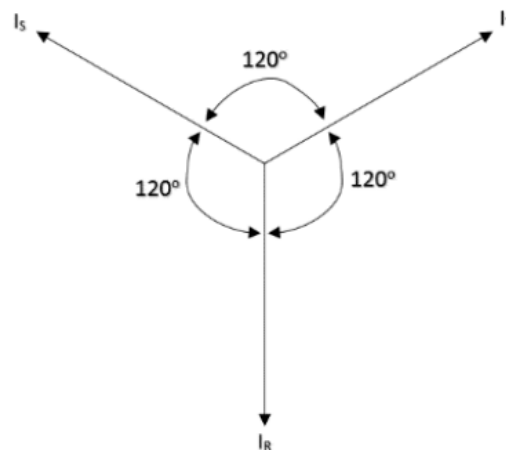
Ketidakseimbangan beban terjadi ketika suatu sistem tidak memenuhi kriteria keseimbangan beban, agar suatu beban dapat dikatakan seimbang, harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut (Kusnanto, 2022):

1. Ketiga vektor tegangan atau arus memiliki nilai yang sama.

2. Ketiga vektor tegangan atau arus membentuk sudut 120° .

Ketidakseimbangan beban umumnya muncul dalam tiga kondisi yang berkaitan dengan persyaratan beban seimbang yaitu:

1. Ketiga vektor memiliki besar yang sama, namun tidak membentuk sudut 120° .
2. Ketiga vektor memiliki sudut 120° , tetapi besarnya tidak sama.
3. Ketiga vektor memiliki besaran yang berbeda dan tidak membentuk sudut 120° .



Gambar 2.5 Vektor Diagram Arus Seimbang (Muflizar A. R. et al., 2021)

Gambar 2.5 memperlihatkan diagram vektor arus pada sistem tenaga listrik tiga fasa dalam kondisi beban seimbang. Pada sistem tiga fasa, arus yang mengalir di masing-masing fasa memiliki besar yang sama dan sudut fasa yang berbeda sebesar 120° antar fasa. Hal ini ditunjukkan oleh arah vektor arus I_R , I_S , dan I_T yang saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

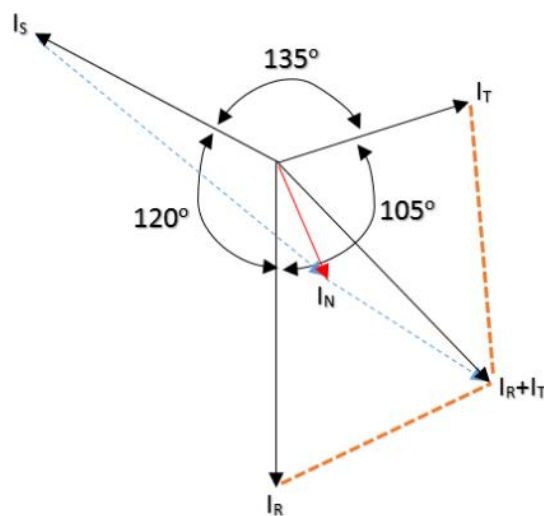
Pada gambar, vektor I_R mengarah ke bawah sebagai referensi, kemudian vektor I_S berada pada posisi 120° terhadap I_R ke arah kiri atas, dan vektor I_T berada 120° terhadap I_S ke arah kanan atas. Arah putaran sudut antar fasa ditunjukkan oleh

panah melingkar, yang umumnya mengikuti urutan standar sistem tenaga yaitu R–S–T.

Dalam sistem beban seimbang, ketiga vektor arus memiliki panjang (besar) yang sama dan jika dijumlahkan secara vektor, hasilnya akan membentuk segitiga tertutup atau menghasilkan nol. Dengan kata lain, jumlah vektor arus dalam sistem tiga fasa beban seimbang adalah:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.20)$$

Kondisi ini menunjukkan bahwa tidak terdapat arus yang mengalir pada konduktor netral dalam sistem tiga fasa empat kawat ketika bebannya seimbang. Diagram vektor ini penting untuk memahami relasi antar arus fasa dalam sistem tenaga tiga fasa serta menjadi dasar dalam analisis perhitungan arus dan tegangan dalam sistem tersebut.



Gambar 2.6 Vektor Diagram Arus Tidak Seimbang (Muflizar A. R. et al., 2021)

Gambar 2.6 menunjukkan diagram vektor arus sistem tiga fasa dalam kondisi beban tidak seimbang. Terlihat bahwa sudut antar arus fasa berbeda, yaitu 120°, 135°, dan 105°, sehingga jumlah vektor arus tidak membentuk segitiga tertutup.

Akibatnya, timbul arus netral sebagai resultan dari ketiga arus fasa yang tidak seimbang. Arus netral ini mengalir di penghantar netral untuk menyeimbangkan ketidaksamaan beban antar fasa.

Untuk menghitung ketidakseimbangan beban dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{rata-rata} = \frac{|I_R| + |I_S| + |I_T|}{3} \quad (2.21)$$

$$I_R = a \times I_{rata-rata} \quad (2.22)$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata} \quad (2.23)$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata} \quad (2.24)$$

Dalam kondisi sistem yang seimbang, nilai koefisien a, b, dan c masing-masing adalah sebesar 1. Oleh karena itu, nilai rata-rata ketidakseimbangan, yang dinyatakan dalam persentase, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Load\ Unbalance = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.25)$$

Menurut IEEE Std 1159-2019, ketidakseimbangan arus dalam sistem tenaga listrik tiga fasa dapat dievaluasi melalui dua pendekatan utama. Secara praktis, ketidakseimbangan arus dinyatakan sebagai deviasi arus terbesar antar fasa terhadap nilai rata-rata arus sistem, di mana batas toleransi umumnya berada pada rentang 10% hingga 30%, bergantung pada karakteristik dan sensitivitas beban yang digunakan.

2.7 Komponen Simetris

Pada tahun 1918, C. L. Fortescue memperkenalkan sebuah metode yang dapat dimanfaatkan untuk menganalisis sistem tenaga listrik tiga fasa dalam kondisi tidak seimbang. Ketidakseimbangan tersebut dapat direpresentasikan melalui komponen

simetris. Dalam sistem tiga fasa empat kawat, arus netral merupakan hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa yang telah diuraikan ke dalam komponen simetris. Secara umum, satu set tegangan tiga fasa yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga buah komponen tegangan yang masing-masing bersifat seimbang (Prapto, 2016).

Komponen simetris dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

1. Komponen urutan positif

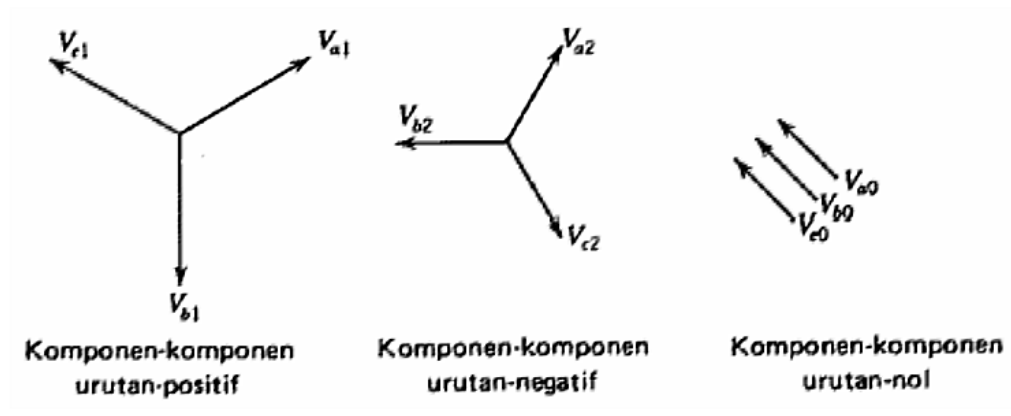
Komponen urutan positif merupakan tiga buah fasor yang memiliki nilai magnitudo yang sama, dengan posisi sudut terpisah sebesar 120° searah jarum jam (*clockwise*) dan mengikuti urutan fasa yang identik dengan susunan fasa aslinya, yaitu R, S, dan T (Prapto, 2016).

2. Komponen urutan negatif

Komponen urutan negatif terdiri dari tiga fasor dengan nilai magnitudo yang sama, yang saling terpisah sebesar 120° berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*), serta memiliki urutan fasa yang berkebalikan dengan susunan fasa aslinya, yaitu mengikuti urutan R, T, dan S (Prapto, 2016).

3. Komponen urutan nol

Komponen urutan nol merupakan tiga buah fasor yang memiliki nilai magnitudo yang sama, di mana ketiganya berada pada posisi sudut fasa yang sama atau tanpa perbedaan sudut fasa di antara satu dengan lainnya (Prapto, 2016).



Gambar 2.7 Fasor Komponen Simetris (Prapto, 2016)

Dalam metode pemecahan masalah menggunakan komponen simetris, ketiga fasa dinyatakan sebagai a, b, dan c, sehingga urutan fasa tegangan maupun arus adalah a-b-c. Urutan fasa untuk komponen urutan positif tetap mengikuti urutan a-b-c, sedangkan untuk komponen urutan negatif mengikuti urutan a-c-b.

Apabila fasor asli berupa tegangan, maka dapat dinyatakan sebagai V_a , V_b , V_c . Ketiga himpunan komponen simetris diberi subskrip untuk membedakan jenis urutannya, yaitu:

- Subskrip 1 untuk komponen urutan positif
- Subskrip 2 untuk komponen urutan negatif
- Subskrip 0 untuk komponen urutan nol

Sebagai contoh, komponen urutan positif dari tegangan fasa V_a , V_b , V_c masing-masing adalah V_{a1} , V_{b1} , V_{c1} , sedangkan untuk komponen urutan negatif adalah V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} , dan untuk komponen urutan nol masing-masing dinyatakan sebagai V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} (Nugraha et al., 2022).

Adapun penjumlahan komponen simetris dalam matriks:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Untuk lebih sederhana maka didapat matriks:

$$A = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \text{ dan } A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Sehingga diperoleh matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Setelah langkah-langkah diatas telah diuraikan maka didapat persamaan:

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (2.29)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.30)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.31)$$

Pada persamaan di atas, terdapat simbol huruf a yang berfungsi sebagai operator putaran sebesar 120° berlawanan arah jarum jam di bidang kompleks. Operator ini merupakan bilangan kompleks dengan nilai magnitudo satu dan sudut fasa sebesar 120° , yang secara matematis didefinisikan sebagai:

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

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

Persamaan (2.29) (2.30) (2.31) juga dapat digunakan untuk menghitung komponen simetris arus.

2.8 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT), yang dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai Transformasi Fourier Cepat, merupakan algoritma yang digunakan untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan inversnya secara lebih cepat dan efisien. FFT banyak diterapkan di berbagai bidang, mulai dari pengolahan

sinyal digital hingga penyelesaian persamaan diferensial parsial, serta dalam algoritma-algoritma untuk operasi penggandaan bilangan integer dalam jumlah besar. Secara umum, algoritma FFT terbagi ke dalam dua kelas dasar, yaitu *Decimation In Time* (DIT) dan *Decimation In Frequency* (DIF). Istilah '*fast*' dalam FFT menunjukkan bahwa metode ini memiliki kecepatan perhitungan yang jauh lebih tinggi dibandingkan algoritma Fourier Transform konvensional. FFT merupakan salah satu metode transformasi yang paling umum digunakan untuk mengkonversi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi, di mana dalam pengolahan sinyal, FFT digunakan untuk menganalisis periode dan frekuensi suatu isyarat (Kurnia & Mukhaiyar, 2021).

Sinyal periodik dalam sistem tenaga listrik dapat dinyatakan sebagai penjumlahan komponen-komponen gelombang sinusoidal. Persamaan umum deret fourier dalam domain waktu dituliskan sebagai berikut:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.26)$$

Keterangan:

a_0 adalah komponen DC atau rata-rata sinyal:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

a_n dan b_n adalah koefisien Fourier, dihitung sebagai:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

2.9 Penelitian Terkait

Berdasarkan studi tentang pengaruh harmonisa terhadap arus netral yang pernah dilakukan. Berikut beberapa penelitian yang terkait dapat dilihat pada tabel

2.4

Tabel 2.4 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Analisis Dampak Harmonisa terhadap Arus Netral pada Transformator Distribusi 2000 kVA Gedung GKB 2 Universitas Muhammadiyah Semarang	Nurul Luayli Musoffiyah, Achmad Solichan, Laily Muntasiroh, Aris Kriswanto	Transformator Distribusi Gedung GKB 2 Universitas Muhammadiyah Semarang 2024	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak harmonisa terhadap arus netral pada transformator 2000 kVA. Metode penelitian dilakukan dengan analisis dan pengukuran menggunakan alat PQA.
2	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral Pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500	Riki Khomarudin, Lukman Subekti	PPSDM Migas Cepu 2020	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar nilai arus pada saluran netral dan kandungan harmonisa yang terdapat pada sistem distribusi

	kVA di PPSDM Migas Cepu			akibat sistem penggunaan dan beban yang terpasang. Metode penelitian dilakukan dengan metode pengukuran menggunakan Tang Ampere, dan Fluke 435, serta analisis menggunakan penjumlahan vektor untuk perhitungan penjumlahan arus netral pada trafo distribusi.
3	Analisis Ketidakseimbangan Fasa Dan Harmonisa Pada Sistem <i>Air Handling Unit</i> (Ahu) Di Pt. Medion Farma Jaya	Dewi Purnama Sari, Een Taryana, Giri Angga Setia	Pt. Medion Farma Jaya 2020	Penelitian ini bertujuan untuk untuk menganalisis ketidakseimbangan fasa dan harmonisa dikarenakan pembebanan arus masukan untuk fan evaporator yang tidak seimbang, serta penggunaan

				<i>variable speed drive</i> (VSD) yang merupakan salah satu peralatan nonlinier yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor blower pada sistem AHU.
4	Analisis Harmonisa Dan Simulasi Filter Pasif Pada Kawat Netral BTS Di Gedung Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Kristen Indonesia	Jekson Supardi Malau, Eva Magdalena Silalahi, Robinson Purba	Gedung Prodi Teknik Mesin UKI 2023	Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui harmonisa pada kawat netral BTS yang mencakup distorsi tegangan dan arus yang akibat pemakaian beban nonlinier. Standar yang dipakai pada penelitian ini adalah IEEE 519-2014.
5	Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi-Rugi Daya Pada Transformator	Dwi Apriliansyah, Purwito, Ahmad Gaffar	ULP Karebosi 2021	Penelitian ini membahas kualitas daya listrik terkait harmonisa, menjelaskan

	Distribusi ULP Karebosi			pengaruh harmonisa terhadap rugi-rugi daya pada transformator ULP Karebosi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah observasi langsung dengan melakukan pengukuran menggunakan PQA pada trafo distribusi KAPBL 200 KVA dan EX UWBI 250 KVA pada penyulang Ahmad Yani.
--	----------------------------	--	--	--

Penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan arus netral umumnya difokuskan pada analisis pengaruh harmonisa atau ketidakseimbangan beban terhadap arus netral melalui metode pengukuran langsung pada sistem distribusi tenaga listrik di lapangan. Metode tersebut memberikan gambaran kondisi nyata sistem, namun memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas variasi parameter beban, jenis harmonisa, serta kondisi sistem yang dapat diuji. Berbeda dengan penelitian terdahulu, penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak *MATLAB Simulink*. Dengan metode simulasi, penelitian ini memungkinkan pengujian berbagai skenario beban nonlinier, variasi tingkat

ketidakseimbangan, serta analisis pengaruh komponen harmonisa terhadap arus netral secara terkontrol dan sistematis, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran karakteristik arus netral yang lebih komprehensif pada berbagai kondisi sistem.