

BAB 2

SISTEM TENAGA LISTRIK TIGA FASA

Sistem jaringan listrik yang terpasang di Indonesia merupakan jaringan listrik tiga fasa yang disalurkan oleh produsen listrik, dalam hal ini PLN, ke konsumen listrik yakni rumah tangga dan industri. Secara umum sistem tenaga listrik terbagi ke dalam beberapa bagian yakni pembangkitan, penyaluran (transmisi) dan beban. Berikut skema suatu sistem tenaga listrik tiga fasa.

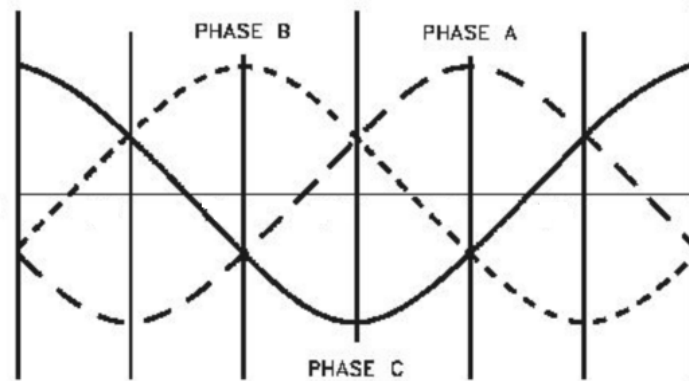


Gambar 2.1 Skema sistem tenaga listrik

Generator akan membangkitkan daya listrik yang akan disalurkan, daya yang dibangkitkan adalah daya listrik tiga fasa. Pada sistem transmisi dibutuhkan daya yang besar, karena pada sistem transmisi ada kerugian daya yang disebabkan oleh faktor jarak. Karena itu, untuk mengurangi kerugian daya tersebut, tegangan akan dinaikkan menggunakan trafo *step-up* menjadi tegangan tinggi atau tegangan extra tinggi. Agar dapat digunakan oleh konsumen, sebelum didistribusikan, tegangan kembali diturunkan menjadi 380/220 V menggunakan trafo *step-down*. Daya yang diterima oleh konsumen adalah daya listrik arus bolak-balik tiga fasa. Untuk industri, daya yang digunakan adalah daya listrik tiga fasa, sedangkan untuk rumah tangga daya yang digunakan adalah daya listrik satu fasa.

2.1. RANGKAIAN LISTRIK 3 FASA

Rangkaian listrik 3 fasa merupakan rangkaian listrik yang memiliki tiga buah keluaran simetris dan memiliki perbedaan sudut untuk setiap fasanya sebesar 120° . Berikut gambar dari gelombang 3 fasa :

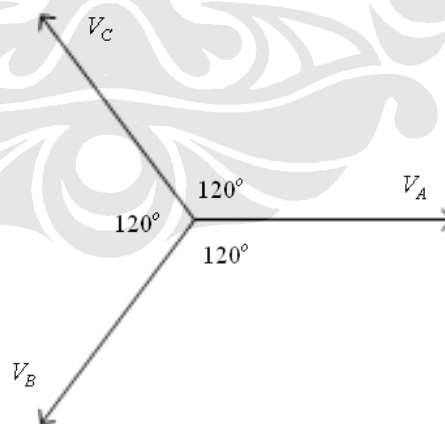


Gambar 2.2 Gelombang tiga fasa

Dari gambar diatas terlihat bahwa setiap fasa memiliki perbedaan sudut dan didapatkan hubungan tegangan untuk masing-masing fasa sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \angle 0^\circ \\ V_b &= V_m \angle -120^\circ \\ V_c &= V_m \angle -240^\circ \end{aligned} \quad (2.1)$$

Berikut diagram fasor dari tegangan 3 fasa :



Gambar 2.3 Diagram fasor tegangan

Arus yang mengalir pada setiap beban dinyatakan sebagai :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

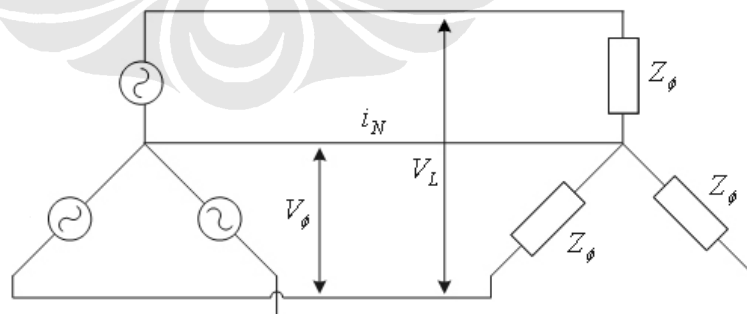
yang pada ketiga fasanya dapat dituliskan :

$$\begin{aligned}
 I_A &= \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle -\theta \\
 I_B &= \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-120^\circ - \theta) \\
 I_C &= \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-240^\circ - \theta)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Pada rangkaian 3 fasa terdapat dua jenis hubungan yakni hubung bintang dan hubung delta. Rangkaian 3 fasa hubung delta menggunakan 3 kawat yakni kawat 3 fasa sedangkan pada rangkaian 3 fasa hubung bintang menggunakan 4 kawat, 3 kawat untuk fasa dan 1 kawat untuk netral. Arus netral pada rangkaian hubung bintang merupakan titik hubung antar ketiga fasanya. Arus netral (I_N) merupakan penjumlahan arus ketiga fasanya karena jalur netral tersebut dilalui oleh ketiga fasa yang ada, menurut persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_A + I_B + I_C \\
 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

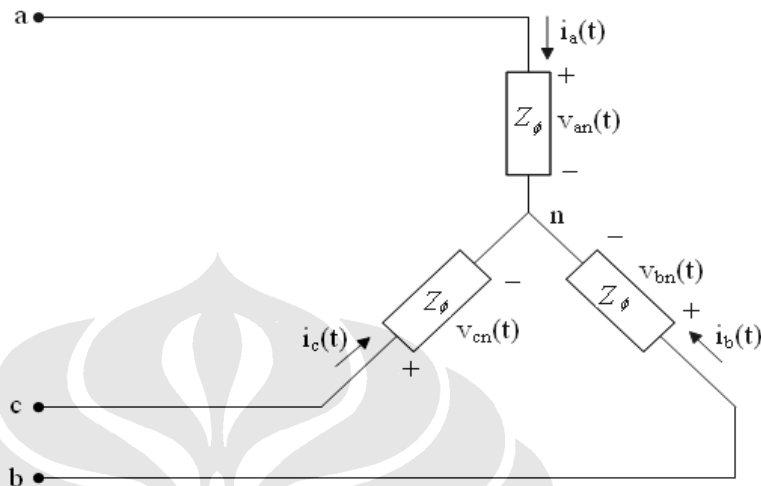
Persamaan (2.4) di atas menunjukkan jika beban yang diaplikasikan dalam suatu tegangan tiga fasa seimbang, maka arus netralnya sama dengan nol karena simetris dan saling meniadakan. Arus netral muncul akibat pembebanan yang tidak seimbang.



Gambar 2.4 Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y)

2.2 DAYA PADA RANGKAIAN LISTRIK 3 FASA

Suatu rangkaian listrik tiga fasa :



Gambar 2.5 Beban hubung bintang seimbang

dengan impedansi fasa $Z_\phi = Z \angle \theta^\circ$. Bila dihubungkan dengan tegangan tiga fasa :

$$\begin{aligned} v_{an}(t) &= \sqrt{2}V \sin \omega t \\ v_{bn}(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_{cn}(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (2.5)$$

dan dengan $I = \frac{V}{Z}$, arus tiga fasanya menjadi :

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 240^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Daya aktual setiap fasa beban dinyatakan dalam persamaan :

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.7)$$

Sehingga daya yang disuplai untuk tiap fasa :

$$\begin{aligned} p_a(t) &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) \\ p_b(t) &= 2VI \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ p_c(t) &= 2VI \sin(\omega t - 240^\circ) \sin(\omega t - 240^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.9)$$

yang digunakan pada persamaan (1.8), didapat :

$$\begin{aligned} p_a(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - \theta)] \\ p_b(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - 240^\circ - \theta)] \\ p_c(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - 480^\circ - \theta)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Daya yang disalurkan pada rangkaian tiga fasa sama dengan jumlah daya pada ketiga fasanya. Dari persamaan (2.10), didapat daya masing-masing fasa terdiri dari komponen konstan dan komponen pulsa (yang berosilasi). Komponen pulsa masing-masing fasa berbeda 120° , sehingga penjumlahan daya ketiga fasa ini akan menghilangkan komponen pulsa dan didapat penjumlahan ketiga komponen konstan yang identik :

$$p_{total}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3VI \cos \theta \quad (2.11)$$

Persamaan daya ini dapat ditulis [1] :

$$S = 3V_\phi I_\phi = 3I_\phi^2 Z \quad (2.12)$$

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos \theta = 3I_\phi^2 Z \cos \theta \quad (2.13)$$

$$Q = 3V_\phi I_\phi \sin \theta = 3I_\phi^2 Z \sin \theta \quad (2.14)$$

Dalam hubungan :

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ P &= S \cos \theta \\ Q &= S \sin \theta \end{aligned} \quad (2.15)$$

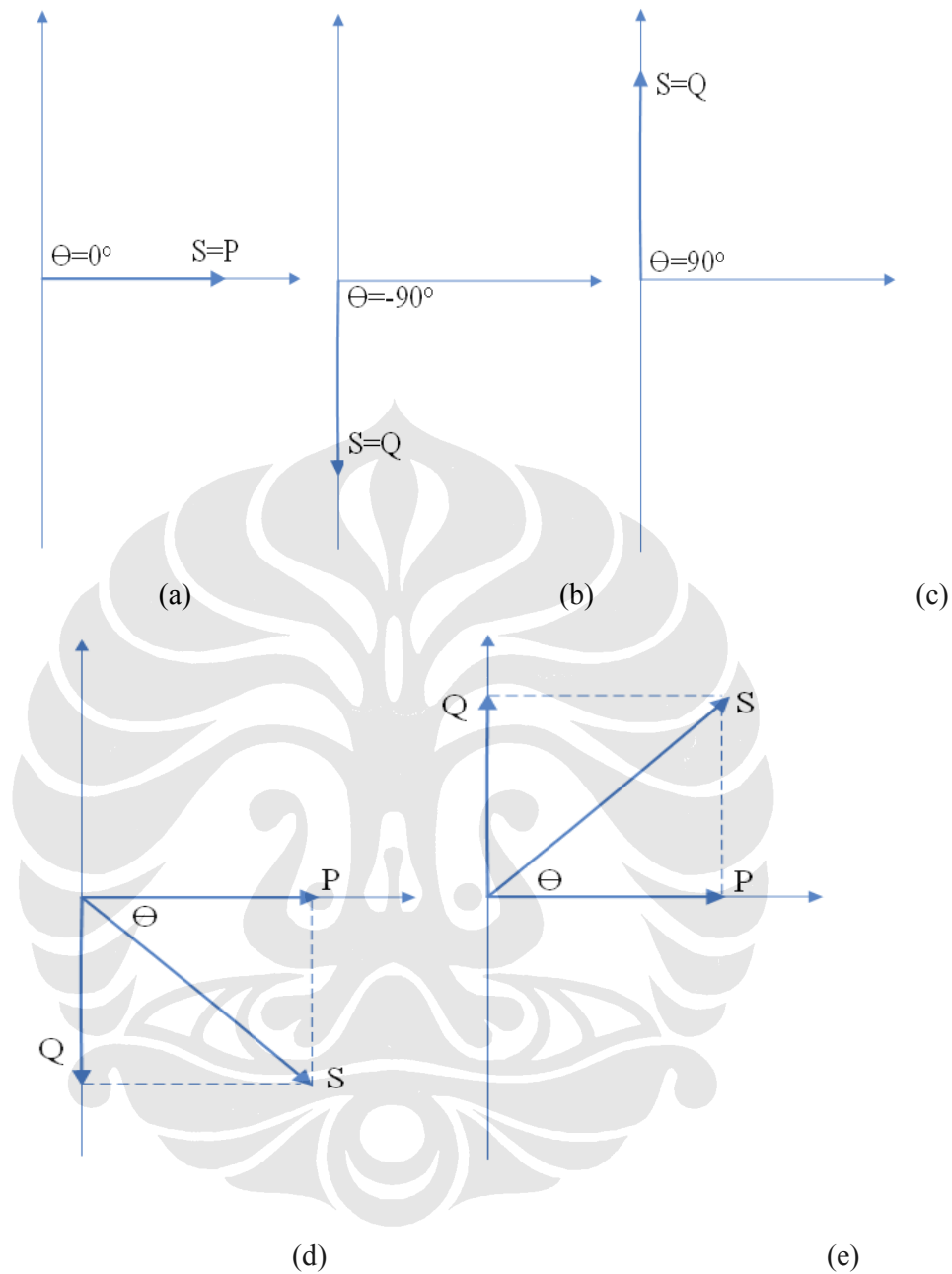
Dengan :

S = Daya total (satuan VA)

P = Daya nyata (satuan Watt)

Q = Daya reaktif (satuan VAR)

Berikut diagram fasor daya tergantung beban totalnya :



Gambar 2.6 Diagram fasor dalam grafik V-I untuk

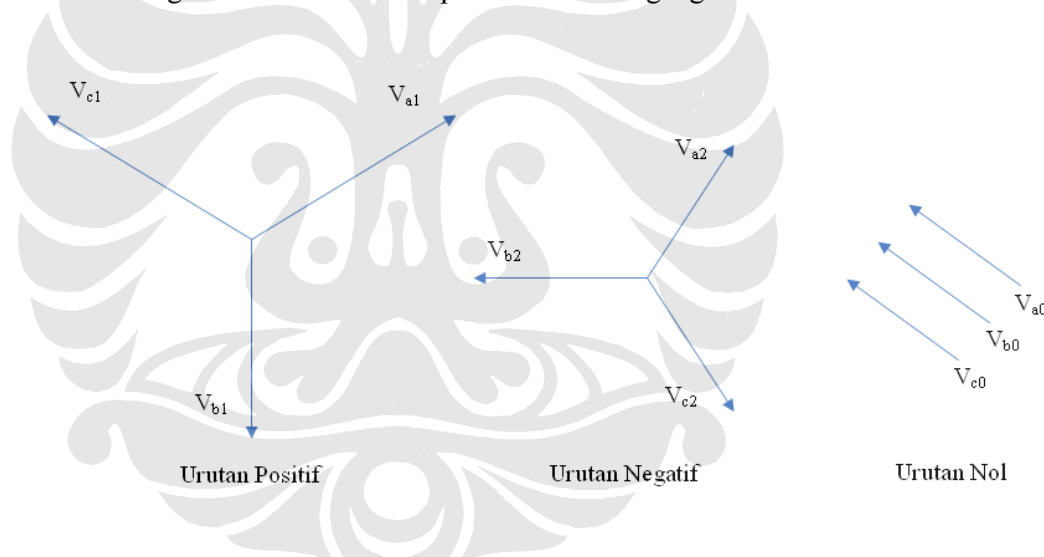
- Beban resistif murni
- Beban induktif murni
- Beban kapasitif murni
- Beban induktif resistif
- Beban kapasitif resistif

2.3 KOMPONEN SIMETRIS

Pada kenyataannya sistem 3 fasa yang ada diberikan beban tidak seimbang. Sistem tiga fasa yang tidak seimbang ini dapat diuraikan menjadi tiga buah komponen simetris untuk memudahkan analisis, yaitu :

1. Komponen urutan positif (*positive sequence*), yang fasornya sama besar dan mempunyai beda fasa 120° , serta urutan fasanya sama dengan urutan fasa aslinya.
2. Komponen urutan negative (*negative sequence*), yang sama seperti urutan positif, hanya urutan fasanya berlawanan dengan urutan fasa aslinya.
3. Komponen urutan nol (*zero sequence*) yang fasornya sama besar dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Berikut gambar fasor dari komponen simetris tegangan.

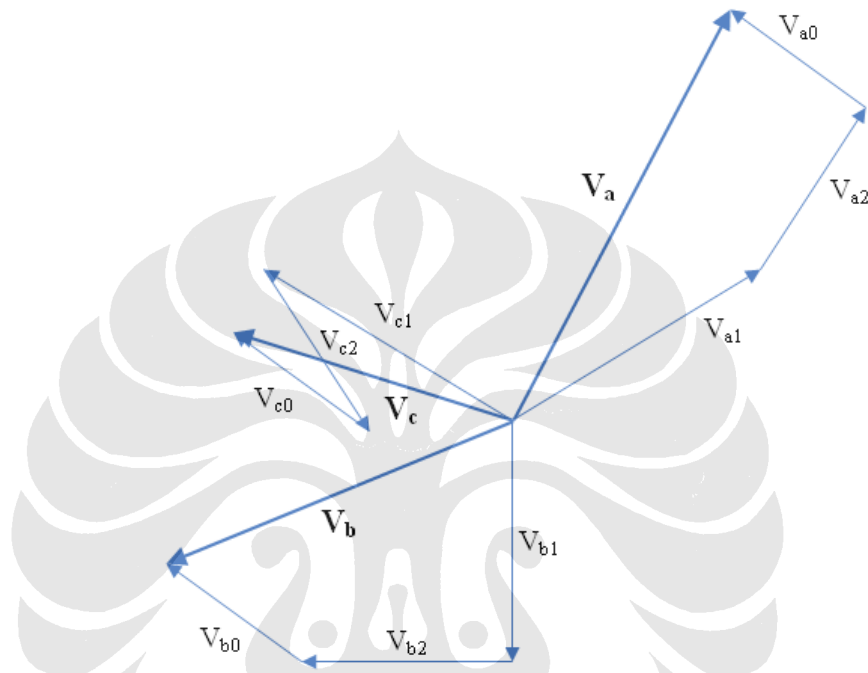


Gambar 2.7 Komponen simetris tegangan dari sistem 3 fasa yang tidak seimbang

Notasi yang digunakan untuk komponen urutan tersebut biasanya diberikan subskrip 1, 2 dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} ; komponen urutan negatifnya V_{a2} , V_{b2} dan V_{c2} ; serta komponen urutan nolnya V_{a0} , V_{b0} dan V_{c0} .

Persamaan tegangan sistemnya merupakan penjumlahan dari masing-masing komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$



Gambar 2.8 Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

Dari gambar 2.8 di atas, didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\
 V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\
 V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

dengan :

$$\begin{aligned}
 a &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\
 a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2.17), maka persamaan (2.16) menjadi :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\
 V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

yang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}
 \tag{2.19}$$

Dengan mengalikan matriks tersebut dengan matriks *invers*-nya (A^{-1}) diperoleh :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{2.20}$$

Sehingga, hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\
 V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Komponen urutan nol tidak terdapat dalam sistem tenaga listrik apabila sistem seimbang. Pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang, pada kabel netralnya dapat mengandung komponen urutan nol. Persamaan-persamaan tegangan tersebut berlaku juga pada persamaan untuk arusnya yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\
 I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \\
 I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \\
 I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\
 I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\
 I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Arus netral yang mengalir adalah jumlah arus yang mengalir pada tiap fasanya. Jadi, berdasarkan persamaan (2.22), maka persamaan arus netralnya dapat dituliskan menjadi :

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \tag{2.23}$$

2.4 PENGUKURAN BESARAN LISTRIK

Dalam suatu rangkaian listrik, terdapat berbagai komponen listrik dengan besar dan satuannya masing-masing. Untuk mendapatkan besar nilai-nilai tersebut, diperlukan pengukuran besaran listrik.

Pengukuran yang dilakukan pada pengujian ini adalah pengukuran arus dan tegangan efektif bolak-balik, pengukuran daya dan faktor daya serta pengukuran energi.

2.4.1 Pengukuran arus dan tegangan efektif bolak-balik

Sumber tegangan yang tersedia untuk konsumen listrik, rumah tangga dan industri, adalah tegangan *sinusoidal* yang memiliki frekuensi 50 Hz dan tegangan 220 V. ini berarti tegangan maksimumnya adalah $220 \sqrt{2}$ V atau sekitar 311,1 V sedangkan tegangan efektifnya adalah 220 V. Harga ini adalah ukuran keefektifan sumber tegangan bolak-balik dalam memberikan daya pada sebuah beban penahan.

Nilai efektif dari setiap arus bolak-balik sama dengan nilai dari arus searah yang mengalir melalui tahanan R yang sama. Daya yang diberikan oleh arus searah terhadap tahanan R adalah sama dengan daya yang diberikan oleh arus bolak-balik. Arus bolak-balik yang diberikan terhadap

tahanan R memiliki daya sesaat sebesar i^2R . Kemudian suatu arus searah mengalir melalui tahanan R yang sama dan menjaga agar arus searah dan memperoleh harga daya yang sama dengan rata-rata arus bolak-balik. Besar arus searah tersebut adalah arus efektif dari arus bolak-balik.

Faktor $\sqrt{2}$ merupakan faktor perbandingan harga maksimum dari arus periodik dengan nilai efektifnya dan hanya dipakai jika fungsi periodik tersebut berupa sinusoidal.

2.4.2 Pengukuran daya dan faktor daya

Untuk sumber arus bolak-balik daya yang berubah terhadap waktu atau daya sesaat merupakan perkalian antara tegangan dan arus.

$$S(t) = V(t) \cdot I(t)$$

Untuk tahanan murni R, daya yang dipakai adalah positif sehingga daya yang dikembalikan ke sumber adalah 0. Untuk insuktansi, ketika mendapat energi bolak-balik, untuk setengah periode akan menyimpan energi elektromagnetis, dan mengembalikan energi tersebut pada sumbernya pada setengah periode berikutnya. Sehingga daya rata-ratanya adalah 0.

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif terhadap daya kompleks. Dapat dinyatakan dengan :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Untuk pembebanan resistif murni, faktor dayanya adalah 1, untuk induktif murni dan kapasitif murni faktor dayanya adalah 0. Beban kapasitif memiliki faktor daya *leading*, dan beban induktif memiliki faktor daya *lagging*.

2.4.3 Pengukuran energi

Energi dalam hal ini adalah energi listrik yang merupakan perkalian dari daya yang digunakan dengan waktu atau pemakaian daya selama waktu tertentu.

$$E = P \cdot t$$

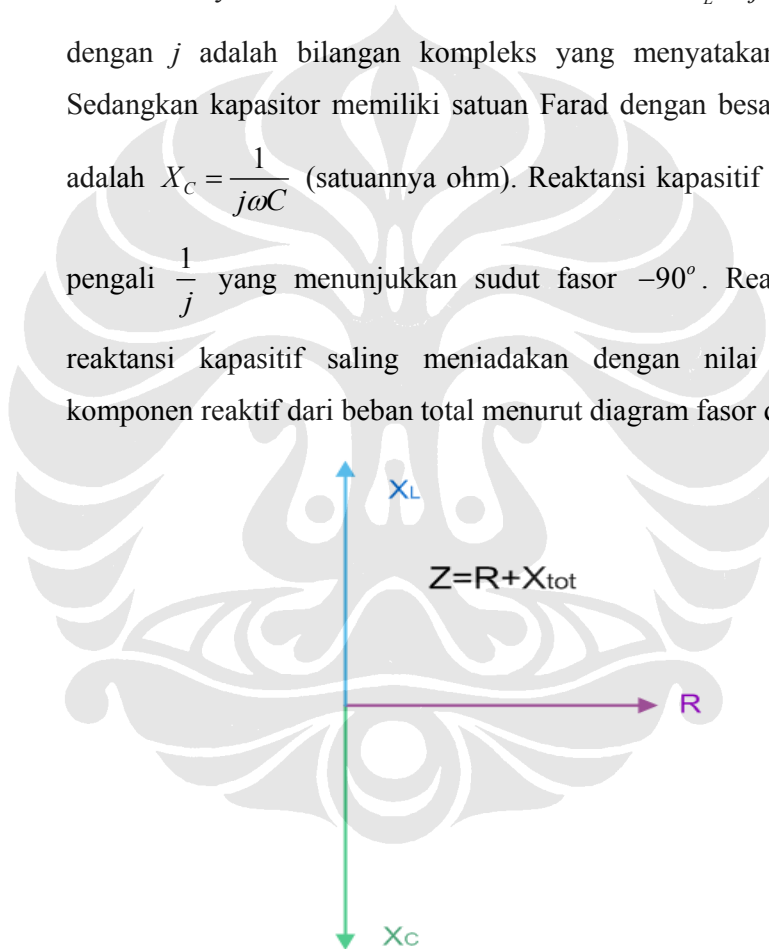
$$E = V \cdot I \cdot \cos \varphi t \text{ (untuk 1 fasa)}$$

Alat ukur yang digunakan adalah kWhmeter yang umum digunakan untuk pengukuran pemakaian energi listrik komersil oleh perusahaan listrik. Jumlah pemakaian energi listrik oleh konsumen dicatat oleh perusahaan listrik menggunakan kWhmeter untuk kemudian ditagihkan kepada para konsumen listrik tersebut.

Pengujian membutuhkan nilai-nilai dari besaran arus, tegangan, daya, faktor daya dan energi listrik. Maka, alat yang digunakan adalah Amperemeter, Voltmeter, Wattmeter, pf-meter dan kWh-meter.

1. Amperemeter, merupakan alat ukur arus listrik. Amperemeter menjadi dua, yaitu Amperemeter arus searah (DC) dan Amperemeter arus bolak-balik (AC). Amperemeter ini harus dipasang seri sebelum rangkaian listrik dihidupkan. Pemindahan alat ukur ini akan memutuskan rangkaian. Masalah ini dapat diatasi dengan Amperemeter yang menggunakan trafo arus (*current transformer*).
2. Voltmeter, merupakan alat ukur tegangan listrik antar dua buah titik. Voltmeter dirangkai secara paralel dengan menghubungkan kedua terminal Voltmeter dengan dua buah titik yang akan diukur tegangannya. Karena dihubung paralel, Voltmeter dapat digunakan bergantian tanpa memutus rangkaian saat pemindahan alat ukur.
3. Wattmeter, merupakan alat ukur daya. Rumus perhitungan daya adalah $P = VI$, yaitu merupakan perkalian nilai tegangan yang ada dengan arus yang mengalir pada konduktor tersebut. Dengan demikian, maka Wattmeter terdiri dari komponen pengukur arus (Amperemeter) yang dirangkai seri dan komponen pengukur tegangan (Voltmeter) yang dirangkai paralel, sehingga Wattmeter dirangkai secara seri-paralel dengan rangkaian seri pada jalur yang diukur arusnya dan kutub alat ukur lain dihubungkan dengan kutub tegangan yang lain yang akan diukur tegangannya dengan jalur yang pertama.
4. Pf-meter, merupakan alat ukur faktor daya ($\text{pf} / \cos \varphi$). Alat ukur ini membandingkan nilai daya nyata dengan nilai daya kompleks. Seperti Wattmeter, alat ukur ini juga dirangkai secara seri-paralel.

Sesuai persamaan (2.15), daya kompleks terdiri dari komponen daya nyata dan daya reaktif. Daya nyata dan daya reaktif dihasilkan dari beban nyata dan beban reaktif. Beban nyata atau beban linier adalah hambatan/ tahanan/ resistor, yang besar nilai bebannya dinyatakan dalam satuan Ω (ohm) yang memiliki sudut fasor 0° . Jenis beban lain selain beban nyata adalah beban reaktif. Beban reaktif memiliki diagram fasor tegak lurus dengan fasor beban nyata. Beban reaktif dibagi dua yaitu induktor dan kapasitor. Satuan induktor adalah Henry dan besar reaktansi induktif adalah $X_L = j\omega L$ (satunya ohm) dengan j adalah bilangan kompleks yang menyatakan sudut fasor 90° . Sedangkan kapasitor memiliki satuan Farad dengan besar reaktansi kapasitif adalah $X_C = \frac{1}{j\omega C}$ (satunya ohm). Reaktansi kapasitif memiliki komponen pengali $\frac{1}{j}$ yang menunjukkan sudut fasor -90° . Reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saling meniadakan dengan nilai selisih merupakan komponen reaktif dari beban total menurut diagram fasor di bawah ini :



Gambar 2.9 Diagram fasor untuk beban R, L dan C

Apabila suatu tegangan dicatu kepada ketiga komponen beban ini, maka akan dihasilkan arus yang mempunyai karakteristik berlainan, yaitu :

- a. Arus pada beban hambatan (*resistance*) murni

$$I_R = \frac{V \angle 0^\circ}{R} \text{ dimana sudut antara arus dengan tegangan adalah sefasa.}$$

b. Arus pada beban induktif murni

$$I_L = \frac{V \angle 0^\circ}{X_L} = \frac{V \angle 0^\circ}{j\omega L} = \frac{V \angle 0^\circ}{\omega L \angle 90^\circ} = \frac{V}{\omega L} \angle -90^\circ$$

dimana terlihat sudut arus tertinggal (lagging) 90° terhadap tegangan.

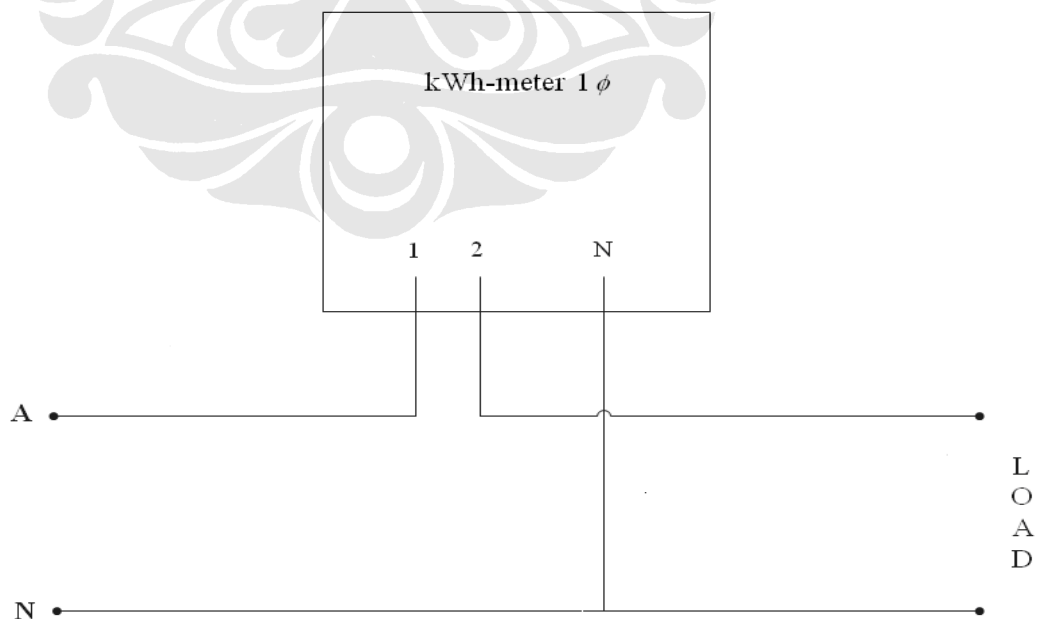
c. Arus pada beban kapasitif murni

$$I_C = \frac{V \angle 0^\circ}{X_C} = \frac{V \angle 0^\circ}{1/j\omega C} = V \angle 0^\circ \cdot j\omega C = V \angle 0^\circ \cdot \omega C \angle 90^\circ = V \omega C \angle 90^\circ$$

dimana terlihat sudut arus mendahului (leading) 90° terhadap tegangan.

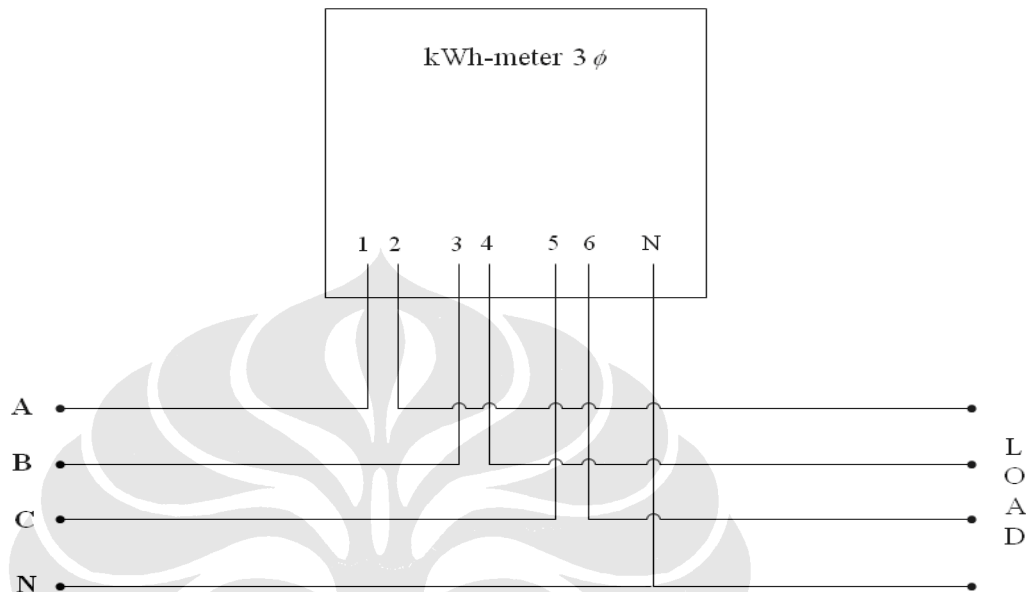
Berbagai kemungkinan diagram fasor untuk beban yang bervariasi dapat dilihat pada gambar 2.6 serta terlihat bahwa nilai daya nyata (P) tidak pernah negatif.

5. KWh-meter, merupakan alat ukur energi listrik dalam satuan kWh (*kilowatt-hour*). Alat ini memiliki komponen pengukuran daya seperti Wattmeter, sehingga juga memiliki komponen pengukur arus (dihubung seri) dan komponen pengukur tegangan (dihubung paralel), yang terlihat pada rangkaian di bawah :



Gambar 2.10 Rangkaian kWh-meter satu fasa

Dan rangkaian untuk kWh-meter tiga fasa :



Gambar 2.11 Rangkaian kWh-meter tiga fasa

Komponen waktu pada pengukuran energi ini dinyatakan oleh durasi penggunaan kWh-meter. kWh-meter bekerja memanfaatkan arus yang mengalir untuk menggerakkan lempengan logam *ferromagnetic* bundar sehingga berputar. Perputaran lempengan ini diteruskan dengan hubungan roda gigi ke *counter*. *Counter* merupakan tampilan angka yang dikalibrasi sedemikian rupa sehingga penggunaan daya listrik sebesar 1(satu) kilowatt selama satu jam akan tepat memutar *counter* sebesar 1(satu) kWh atau 10(sepuluh) skala perpuluhan kWh.

Pada gambar 2.9, terlihat *counter* berupa tampilan angka pada bagian atas. Untuk mengetahui penggunaan energi listrik yang terpakai, dilakukan dengan menghitung selisih angka yang tertera sebelum dan sesudah pemakaian.

kWh-meter satu fasa digunakan untuk mencatat pemakaian listrik pada konsumen perumahan dengan tegangan 220 Volt, sedangkan kWh-meter tiga fasa digunakan pada konsumen industri yang menggunakan jaringan listrik tiga fasa. kWh-meter tiga fasa mencatat seluruh penggunaan energi listrik pada jaringan tiga fasa yang diukur. Berdasarkan persamaan (2.11), kWh-meter tiga fasa

mencatat jumlah penggunaan pada ketiga fasanya. Pada konstruksinya, lempengan bundar pada kWh-meter tiga fasa dihubungkan ketiga fasa yang ada. Penggunaan hanya salah satu atau dua buah fasa tetap memutar lempengan bundar pada alat ini, sehingga penggunaannya tetap tercatat.

