

BAB I DASAR KELISTRIKAN ARUS SEARAH

1. TAHANAN LISTRIK

1.1 Tahanan dan Daya-Antar

Besar dan kecilnya tahanan diukur dengan sebuah pengukur ohm. Satuan tahanan adalah ohm, disingkat Ω .

penghantar yang mempunyai tahanan kecil, mempunyai daya-antar yang besar. Dan penghantar yang mempunyai tahanan yang besar mempunyai daya-antar yang kecil.

Satuan untuk daya-antar ialah: siemens atau dalam satuan: mho (kebalikan ohm), disingkat: \ddot{U} (omega dibalik). Tahanan diberi simbol R. Daya-antar diberi simbol:G. menurut keterangan di atas, tahanan itu kebalikan daya-antar arus. Jadi:

$R = 1/G$(1-1)
$G = 1/R$ (1-2)

1.2. Menghitung Besar Tahanan

Tahanan penghantar berbanding terbalik dengan luas penampangnya
Tahanan penghantar itu berbanding langsung dengan panjangnya,
Tahanan itu tergantung juga pada jenis bahan penghantar.

$$R = \frac{\rho L}{A} \dots\dots\dots (1-3).$$

R = tahanan dalam satuan ohm.

ρ = tahanan jenis dalam satuan ohm-mm²/m

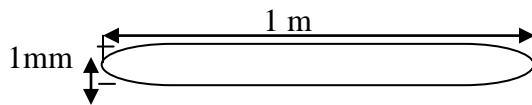
L = panjang dalam satuan m.

A = luas penampang dalam satuan mm

Daftar 1. Tahanan-Jenis dan Daya-Antar-Jenis Beberapa Macam Bahan

Bahan	Tahanan Jenis (ρ)	Daya-Antar-Jenis (g)
Air raksa	0,957	1,045
Aluminium	0,03	33,3
Arang	100-1000	0,001 – 0,01
Besi	0,13	7,69
Bismuth	1,2	0,833
Emas	0,022	45,3
0,5		2
0,08		12,5
Manganin	0,42	2,38
Nikel	0,12	8,33
Nikelin	0,42	2,38
Nikrom	1	1
Perak	0,163	6,14
Platina	0,10 – 0,25	4 – 10
Seng	0,061	16,4
Tembaga	0,0175	57
Timah	0,13	7,69
Timbal	0,21	4,76

Tahanan-jenis bahan ialah tahanan bahan itu yang panjangnya 1 meter dan luas penampangnya 1mm. Tahanan-jenis kita beri simbol: ρ (huruf kecil Yunani: rho).



Gambar 1.3

Satuan untuk tahanan-jenis: ohm – mm /m. Simbol daya-antar-jenis ialah: g , dan satuannya ialah: $m/ohm - mm^2$.

Kita dapat menulis:

$$\boxed{g = 1/\rho} \dots\dots\dots (1-4).$$

1. HUKUM OHM

George Simon Ohm (ahli ilmu fisika Jerman), menemukan bahwa apabila tegangan dinaikkan dua kali, tahanan tetap, maka kuat arus naik juga dua kali, tahanan tetap, maka kuat arus naik juga dua kali, begitu seterusnya. Jadi: Arus di dalam rangkaian, berubah sebanding lurus dengan tegangan yang dipakai.

Apabila tegangan tetap, tetapi tahanannya diperbesar dua kali (diganti penghantarnya), ternyata arus yang mengalir menjadi setengahnya. Dan jika tahanannya diperkecil menjadi dua kali.

Kedua hal diatas dapat dijadikan satu menjadi hukum Ohm, yang dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut :

$$\boxed{V = I \times R} \dots\dots\dots (1-5)$$

Atau : $\boxed{I = V/R} \dots\dots\dots (1-6)$

Atau : $\boxed{R = V/I} \dots\dots\dots (1-7)$

- V = tegangan dalam satuan volt.
- I = arus dalam satuan amper.
- R = tahanan alam satuan ohm.

2. Pengaruh Suhu pada Tahanan

a. Tahanan Linier

$$\boxed{R_t = R_r \times [1 + (t_t - t_r) \times \alpha]} \dots\dots\dots (1-8)$$

Daftar 2 Koefisien Suhu Beberapa Bahan

Bahan	Koefisien Suhu (a)	Bahan	Koefisien Suhu (a)
Air raksa	+ 0,0009	Nikelin	+0,00022
Aluminium	+ 0,0037	Nikrom	+0,00013
Arang	-0,0003 s.d. -0,008	Perak	+0,0036
Besi	+0,0045	Perak-baru	+0,00020
Bismuth	+0,0036	Platina	+0,0024
Emas	+0,0035	Seng	+0,0039
Konstantan	-0,00005	Tembaga	+0,0039
Kuningan	+0,0015	Timah	+0,0042
Manganin	+0,00001	Timbal	+0,0041
Nikel	+0,004	Wolfram	0,0041

b. Tahanan Non Linier

Tahanan PTC dan NTC tidak mengikuti persamaan 1-8 oleh karena itu disebut tahanan tak linier.

1) Tahanan NTC (pengantar panas)

NTC singkatan dari Negative Temperatur Coefisient merupakan bahan penghantar yang lebih baik dalam keadaan panas daripada keadaan dingin dan dinamakan penghantar panas atau thermistor. Bahan tersebut mempunyai koefisien suhu negatif, yang artinya harga tahanannya akan turun pada kenaikan suhu.

2) Tahanan PTC (penghantar dingin)

PTC singkatan dari Positif temperatur coefisien merupakan bahan yang lebih mudah mengalirkan listrik dalam dingin. Hal ini karena kemampuan menghantar listrik bahan ini menurun dengan kenaikan suhunya, yang berarti tahanannya makin besar.

4. Rangkaian Deret atau Seri

$$V_{\text{jumlah}} = V_1 + V_2 + V_3 \dots \dots \dots (1-9)$$

Menurut hukum ohm, tegangan pada tiap lampu itu

$$V_{\text{lampu}} = I_{\text{lampu}} \times R_{\text{lampu}}$$

Karena arus di dalam rangkaian deret itu di semua bagian sama, jadi arus lampu ke satu sama dengan arus lampu kedua. Jadi :

$$V_1 = I \times R_1$$

$$V_2 = I \times R_2$$

$$V_3 = I \times R_3$$

$$\text{Maka dari : } V_j = V_1 + V_2 + V_3$$

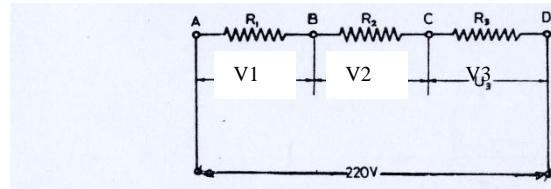
Dapat kita tulis :

$$V_j/I = V_1/I + V_2/I + V_3/I$$

$$R_{\text{jumlah}} = R_1 + R_2 + R_3 \text{ atau tahanan pengganti (} R_p \text{).}$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 \dots \dots \dots (1-10).$$

$$R_p = \sum R$$



CONTOH :

1. Dari gambar di atas Tiga tahanan dari : 50 ohm, 40 ohm dan 20 ohm, dihubungkan deret pada tegangan 220 V seperti dalam gambar 1.6. Hitunglah tahanan pengganti rangkaian deret ini dan arus rangkaian. Hitung juga perbandingan antara tegangan-tegangan bagian dan bandingkan ini dengan perbandingan tahanan-tahanan bagian.

Jawab :

$$R_j = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_j = 50 + 40 + 20 = 110 \text{ ohm.}$$

$$I = V_j = \frac{220}{110} = 2 \text{ A}$$

Gambar 1.6. tiga tahanan dihubung deret

$$V_1 = I \times R_1 = 2 \times 50 = 100 \text{ v}$$

$$V_2 = 2 \times 40 = 80 \text{ v; } U_3 = 2 \times 20 = 40 \text{ v}$$

$$V_1 = V_2 : V_3 = 100 : 80 : 40 = 2,5 : 2 : 1$$

$$R_1 : R_2 : R_3 = 50 : 40 : 20 = 2,5 : 2 : 1$$

Jadi :

Dalam r. seri perbandingan tegangan-tegangan bagian sama dengan perbandingan tegangan bagian. Gambar 1.6, tegangan antara A – D = 220 V. Antara B – D tegangan = 120 V, jadi turun 100 V, turunnya ini sama dengan $I \times R_1$. Tegangan antar C – D = 40 V, ini dari B turunnya ini sama dengan 40 V, ini sama dengan $I \times R_2$. Sampai di titik terendah D, tegangan turun lagi 40 V, ini sama dengan $I \times R_3$.

Penggunaan rangkaian seri :

Misalkan sebuah pemakai arus yang hanya bekerja pada tegangan 110 V, sedangkan sumber tegangan yang ada 220 V. Untuk dapat menggunakan pemakai itu, kita hubungkan deret sebuah tahanan muka deret dengan pemakai, sehingga dapat dihubungkan pada tegangan 220 V, tanpa terjadi arus yang terlalu besar di dalam pemakai itu.

Contoh :

1. Sebuah pemakai mempunyai tahanan 44 ohm dan hanya kuat untuk tegangan 110 V. Harus berapakah tahanan penahan muka yang dihubungkan deret dengan pemakai itu supaya dapat bekerja dengan tegangan 220 V ?

Jawab :

Arus max. Yang boleh mengalir dalam pemakai itu ;

$$I_m = \frac{110}{44} = 2,5 \text{ A}$$

Supaya arus tetap 2,5 A, tahanan jumlah rangkaian seri harus :

$$R_j = \frac{220}{2,5} = 88 \text{ ohm.}$$

R_j = tahanan penahan muka dan tahanan pemakai.

$$R_j = R_{\text{muka}} + R_{\text{pemakai}}$$

$$88 = R_{\text{muka}} + 44$$

$$R_{\text{muka}} = 88 - 44 = 44 \text{ ohm.}$$

5. RUGI TEGANGAN DALAM PENGANTAR

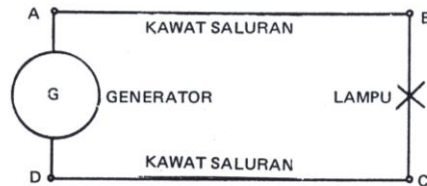
Yang diartikan dengan kerugian tegangan dalam pengantar ialah tegangan yang hilang, atau tegangan yang tidak dapat dimanfaatkan. Hal ini disebabkan karena ada arus yang mengalir melalui pengantar, sedangkan diketahui bahwa pengantar itu mempunyai tahanan.

Rugi-tegangan ini sama dengan :

$$V_r = V_1 - V_2 \quad \rightarrow \quad V_r = \text{Rugi tegangan}$$

$$\varepsilon = (V_1 - V_2)/V_1 \times 100\% \quad \dots\dots\dots 1-11$$

Kerugian tegangan ini terjadi di dalam saluran pengantar yang menghubungkan pusat (titik) pemberi tegangan dengan pemakai arus. Misalkan sebuah generator dalam gb. 1.7, membangkitkan tegangan 110 V antara kedua jepitnya. Melalui dua kawat saluran pertama (antara A dan B) mempunyai tahanan 0,5 ohm. Tahanan kawat saluran antara C dan D juga 0,5 ohm. Dalam rangkaian ini besar tahanan pengganti : $R_p = 0,5 + 10 + 0,5 = 11$ ohm.



Gambar 1.7. Rugi-rugi di dalam saluran antara generator dan pemakai

Arus dalam rangkaian :

$$I = \frac{V}{R_p} = \frac{110}{11} = 10 \text{ A.}$$

Dari gambar 1.7. dari titik A ke B, terjadi turun tegangan.

$$V_{AB} = I \times R_{AB} = I \times \text{tahanan pengantar pertama} \\ = 10 \times 0,5 = 5 \text{ volt.}$$

Turun tegangan dari B ke C :

$$V_{BC} = I \times R_{BC} = I \times R_{\text{lampu}} \\ = 10 \times 10 = 100 \text{ volt.}$$

Dari C ke D turun tegangan :

$$V_{CD} = I \times R_{CD} = I \times \text{tahanan pengantar kedua.} \\ = I \times 0,5 = 5 \text{ volt.}$$

Tegangan yang dipakai lampu hanya : 100V, sedangkan yang diberikan oleh generator 110V. Rugi tegangan :

$$V_r = V_1 - V_2 = V_{\text{gen}} - V_{\text{lampu}} = 110 - 100 = 10 \text{ v.}$$

Rugi tegangan ini terjadi di dalam kedua kawat saluran.

$$V_r = 5 + 5 = 10 \text{ V (lihat } V_{AB} \text{ dan } V_{CD} \text{ diatas).}$$

Panjang dan penampang kedua kawat itu sama, jadi tahananannya sama.

Tahanan kawat saluran ialah :

$$R_k = \frac{\rho \times L}{A}$$

Tahanan dua kawat :

$$2 R_k = \frac{2 \times \rho \times L}{A}$$

jadi kerugian tegangan di dalam pengantar :

$$\boxed{V_r = \frac{I \times 2 \times \rho \times L}{A}} \dots\dots\dots (1-12)$$

$$V_r = I \times 2 R_k$$

$$\boxed{V_r = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{A}} \dots\dots\dots (1-13)$$

Lebih jauh letak pemakai dari sumber tegangan, lebih panjang kawat pengantarnya, jadi lebih besar tahanan kawat itu. Maka kerugian tegangan pun makin besar, dan makin rendah tegangan pemakai. Kalau tegangan pemakai terlalu rendah, pemakai tidak akan dapat bekerja baik.

Untuk mencegah kejadian itu, PLN menentukan (dalam peraturan instalasi), besar rugi tegangan masimal. dalam pengantar yang diperkenankan (tidak boleh dilampaui). Pada umumnya 2% dari tegangan kerja untuk instalasi (pemasangan) penerangan dan 5% untuk pemasangan daya (motor-motor listrik).

6. MENENTUKAN PENAMPANG KAWAT SALURAN

Dari persamaan (1-13) :

$$V_r = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{A} \quad \text{dapat kita tulis :}$$

$$\boxed{A = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{V_r}} \dots\dots\dots (1-14).$$

Kalau yang dinyatakan bukan tahanan jenisnya, tetapi antaran jenisnya (g), maka rumus (3-15) menjadi :

$$\boxed{A = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{g \times V_r}} \dots\dots\dots (1-15).$$

Rugi tegangan telah ditentukan dalam persen (%) dari tegangan kerja, ialah persen (ϵ %), maka rugi tegangan sama dengan :

$$V_r = \epsilon \% \times V$$

$$V_r \epsilon = \frac{\epsilon}{100} \times V$$

Dalam persamaan (3-15), harga V_r dapat diganti dengan $\frac{\epsilon}{100} \times V$, maka:

$$A = 100/\epsilon \times \frac{2 \times I \times \rho \times L}{V}$$

$$A = \frac{100 \times 2 \times I \times \rho \times L}{\epsilon \times V}$$

atau

$$A = \frac{200 \times I \times \rho \times L}{\epsilon \times V} \dots\dots\dots (1-16)$$

$$A = \frac{200 \times I \times L}{G \times \epsilon \times V} \dots\dots\dots (1-17)$$

L = Panjang satu kawat saluran, atau jarak pemakai dari sumber arus, dalam satuan meter.

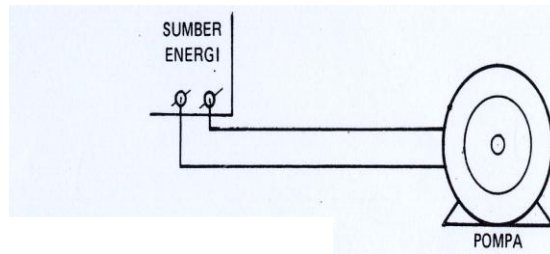
Jika dari perhitungan dengan menggunakan rumus (1-16) atau (1-17), telah kita dapatkan besar penampang yang sesuai dengan kerugian tegangan yang diizinkan, kita harus memeriksa lagi apakah penampang itu cukup sesuai untuk arus yang diantaranya, dengan melihat daftar 3. Dalam daftar ini dapat kita baca kuat arus maximum yang diizinkan untuk macam-macam penampang kawat tembaga bersekat dan besar pengaman lebur untuk penampang itu. Karena pengaman leleh itu baru akan putus pada arus sekitar 1,25 kali harga nominalnya, maka harga nominal pengaman-pengaman leleh harus lebih kecil daripada harga arus maximum.

Daftar 3. penampang kawat tembaga bersekat karet dengan arus maximum dan nilai pengaman leleh (V.D.E).

Penampang tembaga dalam mm ²	Kuat arus yang diizinkan dalam amper	Kuat arus nominal pengaman dalam amper
1,5	14	10
2,5	20	15
4	25	20
6	31	25
10	43	35
16	75	60
25	100	80
35	125	100
50	160	125
70	200	160
95	240	200
120	280	225
150	325	250
185	380	300
240	450	350
300	525	400
400	540	500
500	760	600
625	880	700
800	1050	850
1000	125	1000

Contoh:

1. Sebuah pompa listrik memakai arus 5 amper pada tegangan 110 volt, gambar 1.8. Jarak antara pompa dan sumber listrik: 100 meter. Penampang kawat pengantar (tembaga): 2,5 mm². Tahanan jenisnya: 0,0175 ohm/mm²/m. Berapakah tinggi tegangan sumber listriknya?



Gambar 1.8

Jawab:

Besar rugi tegangan dalam pengantar

$$V_r = \frac{I \times 2 \times \rho \times L}{A}$$

$$V_r = \frac{2 \times 5 \times 0,0175 \times 100}{2,5} = 7 \text{ Volt.}$$

Jadi tegangan sumber listrik:

$$V_1 = V_2 + V_r = 110 + 7 = 117 \text{ Volt.}$$

2. Pada sebuah lampu mobil tertulis 6V/5A. Lampu ini, dengan perantara dua kawat tembaga yang jumlah panjangnya: 100 m dan penampangnya 2,5 mm², dihubungkan pada baterai akumulator yang gglnya 6 V. Tahanan dalam baterai diabaikan. Berapakah kuat arus yang mengalir di dalam lampu? Dan berapakah tegangan lampu dan kerugian tegangan dalam pengantar?

Jawab:

Tahanan lampu:

$$R_{\text{lampu}} = \frac{V}{I} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ ohm.}$$

Tahanan kawat:

$$\begin{aligned} R_k &= \rho \frac{L}{A} \\ &= \frac{0,0175 \times 100}{2,5} \\ &= 0,7 \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

Tahanan pengganti dari rangkaian deret ini:

$$R_p = 0,7 + 1,2 = 1,9 \text{ ohm.}$$

Tegangan jepit baterai ; 6 volt sama dengan ggl. Karena tahanan dalam baterai diabaikan ($R_p = 0$), jadi $V_r = 1 + V_r = 0$.

Kuat arus dalam lampu sama dengan yang diberikan baterai.

Jadi:

$$I = \frac{V}{R_p} = \frac{6}{1,9} = 3,2 \text{ amper}$$

Tegangan pada lampu:

$$\begin{aligned} V_{\text{lampu}} &= I \times R_{\text{lampu}} \\ &= 3,2 \times 1,2 = 3,8 \text{ volt.} \end{aligned}$$

Rugi tegangan dalam pengantar:

$$V_r = 6 - 3,8 = 2,2 \text{ volt.}$$

Karena arus mapupun tegangan pada lampu tidak memenuhi syarat (seharusnya: 6V/5A, disini hanya: 3,8V/1,2A) maka nyala lampu pun suram.

3. Sebuah rumah tinggal memerlukan arus sebesar 5 amper. Tegangan pada tiang listrik: 110 volt. Jarak antara rumah dan tiang: 75 m. Kawat saluran yang digunakan, kawat besi. Kerugian tegangan yang diizinkan: 2%. Berapakah garis tengah kawat besi yang digunakan?

$$\rho_{\text{besi}} = 0,12.$$

Jawab:

Penampang kawat saluran, menurut rumus (3-16), ialah:

$$A = \frac{200 \times I \times \rho \times L}{\epsilon \times V}$$

$$A = \frac{200 \times 5 \times 0,12 \times 75}{2 \times 110}$$

$$A = 40 \text{ mm}^2 .$$

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$\text{Jadi: } d^2 = \frac{4}{\pi} \times A$$

$$\text{Dan: } d = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 40}{3,14}} = 7 \text{ mm.}$$

4. Sebuah motor listrik memakai arus 29,4 amper. Jarak antara motor dan saklar: 40 m. Tegangan pada saklar 220 volt. Kawat penghubung ialah kawat tembaga dengan tahanan jenis 1/57 ohm.mm²/m atau hantaran jenis 57 m/ohm.mm² . Rugi tegangan yang diizinkan 5%. Berapakah penampang kawat minimum yang dapat dipakai?

Jawab:

Penampang:

$$A = \frac{200 \times I \times L}{g \times \epsilon \times V}$$

$$A = \frac{200 \times 29,4 \times 40}{57 \times 5 \times 220}$$

$$A = 13,1 \text{ mm}^2$$

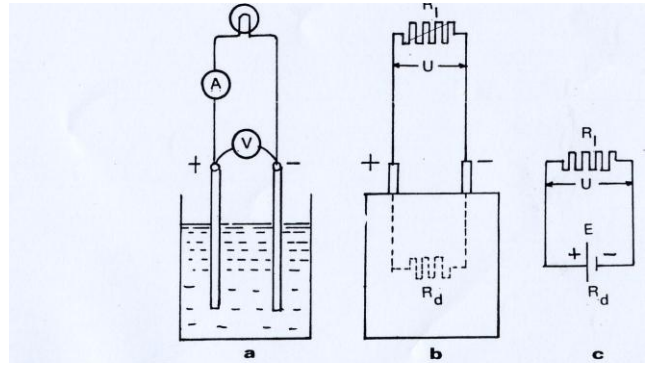
Dalam perdagangan penampang ini tak ada, jadi diambil yang 16 mm². Arus yang diperkenankan untuk kawat dengan penampang ini, dalam daftar 5,75 amper. Jadi memenuhi syarat.

7. RUGI TEGANGAN DI DALAM SUMBER LISTRIK

Yang dimaksud dengan rugi tegangan didalam sumber arus ialah turun tegangan di dalam sumber arus yang diakibatkan oleh arus yang mengalir di dalam sumber arus.

Dalam gambar 1.9 kita lihat arus mengalir dari kutub positif sumber arus ke lampu (pemakai), ke kutub negatif di dalam sumber arus, berjalan dari kutub negatif ke kutub positif.

Gambar 1.9 Rugi tegangan dalam sumber arus



Ggl yang terdapat di dalam sumber arus itulah yang mendorong arus mengalir di dalam rangkaian tertutup: dari kutub positif, ke lampu, ke kutub negatif, ke dalam sumber arus, kembali ke kutub positif dan seterusnya. Gaya gerak listrik (ggl) itu dalam bahasa inggrisnya: Electro Motive Force, disingkat E.M.F. dan diberi symbol: E, satuannya: volt. Tegangan antara kedua jepit sumber arus disebut: *tegangan jepit*, diberi symbol: V. Tegangan jepit inilah yang mendorong arus dari jepit positif ke dalam pemakai, terus kembali ke jepit negatif. Jadi besar tegangan jepit dalam gambar 1.9 itu menurut hukum ohm, sama dengan kuat arus dikalikan dengan tahanan lampu. Tahanan lampu (R_{lampu}) berada di luar sumber arus, maka disebut: tahanan luar, diberi symbol R_1 . Jadi kita dapat menulis:

$$\boxed{V = I \times R_1} \dots\dots\dots (1-18).$$

Ketika arus mengalir di dalam sumber arus, melalui elektrolit, yang merupakan pengantar, juga mendapat rintangan seperti halnya di dalam pengantar lain. Rintangan ini disebut tahanan. Tahanan ini disebut *tahanan dalam* sumber arus, karena terdapat didalamnya. Karena jalan arus didalam tahanan dalam ini, terjadilah turun tegangan atau *rugi tegangan dalam sumber arus*, sebesar:

$$\boxed{V_r = I \times R_{d1}} \dots\dots\dots (1-19).$$

- V_r = kerugian tegangan di dalam sumber arus.
- R_{d1} = tahanan dalam sumber arus.
- I = arus yang dikeluarkan (diberikan) oleh sumber arus.

Di atas diterangkan bahwa ggl-lah yang mendorong arus dalam rangkaian tertutup yang terdiri dari sumber arus dan pemakai (lampu) yang memiliki tahanan luar dan tahanan dalam. Jadi besar ggl:

$$\boxed{E = I \times (R_1 + R_{d1})} \dots\dots\dots(1-20).$$

Atau $E = I \times R_1 + I \times R_{d1}$

Atau
$$E = V + I \times R_{d1} \dots\dots\dots (1-21).$$

Atau
$$E = V + V_r \dots\dots\dots (1-22).$$

Dari persamaan (1-20) kita dapat menulis:

$$I = \frac{E}{R_{d1} + R_1} \dots\dots\dots (1-23).$$

- I = Arus yang dikeluarkan sumber arus, dalam satuan amper.
- E = Besar ggl di dalam sumber arus, dalam satuan volt.
- R_{d1} = Tahanan dalam sumber arus, dalam satuan ohm.
- R₁ = Tahanan luar, dalam satuan ohm.

Apabila sumber arus tidak diberi beban, artinya tidak ada pemakai yang dihubungkan kepadanya, maka sumber arus tidak mengeluarkan arus, menurut persamaan (1-21):

$$E = V + I \times R_{d1}$$

$$E = V + 0$$

Karena arus sama dengan nol, jadi $I \times R_{d1} = 0$, sehingga untuk sumber arus yang tidak berbeban: besar tegangan jepitnya sama dengan ggl-nya.

Apabila sumber arus itu dihubungkan kepada tegangan jepit sumber arus yang lain, yang lebih tinggi ggl-nya, maka tegangan jepit sumber arus pertama sama dengan tegangan jepit sumber arus kedua. Kini, untuk sumber arus pertama, tegangan jepitnya lebih tinggi daripada ggl-nya dan arus diberikan oleh sumber arus kedua kepada sumber arus pertama. Sumber arus pertama tidak mengeluarkan arus, tetapi menerima arus. Jadi kita dapat menarik kesimpulan sebagai berikut:

- ggl $E = V$, bila sumber arus tidak mengeluarkan arus (tak berbeban).
- ggl E lebih besar daripada V , apabila sumber arus memberi arus kepada pemakai (berbeban).
- ggl E lebih kecil daripada V , jika sumber arus menerima arus dari luar.

Contoh:

1. Sebuah sumber arus dihubungkan dengan sebuah pemakai yang tahananannya 5 ohm. Tegangan pada pemakai tersebut kita ukur, terdapat sama dengan 1,5 volt. Apabila pemakai itu dilepas, lalu kita ukur tegangan pada jepit sumber arus, ternyata sama dengan 2 volt. Berapakah besar rugi-tegangan dalam sumber arus, dan berapakah besar tahanan dalamnya?

Jawab:

$$E = V + V_r, \text{ kita dapat menulis:}$$

$$V_r = E - V$$

$$V_r = 2 - 1,5 = 0,5 \text{ volt.}$$

Dari persamaan $V = I \times R_1$

$$I = \frac{V}{R_1}$$

$$I = \frac{1,5}{5} = 0,3 \text{ amper.}$$

Dari $V_r = I \times R_{d1}$ (1-19), dapat kita tulis:

$$R_{d1} = \frac{V}{I}$$

$$\text{Jadi tahanan dalam: } R_{d1} = \frac{0,5}{0,3} = 1,6 \text{ ohm.}$$

8. HUKUM KIRCHHOFF I.

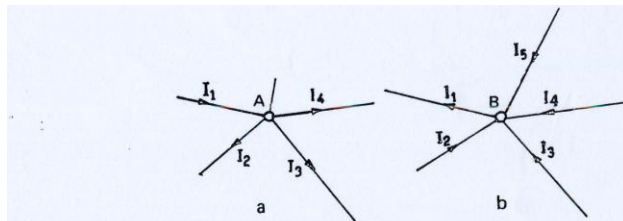
Hukum Kirchhoff I mengatakan bahwa:

Jumlah arus dalam suatu titik percabangan selalu sama dengan nol. Dalam gambar 1-10, arus yang masuk ke dalam titik percabangan A, sama dengan arus yang meninggalkannya. Karena arus-arus tidak dapat bertumpuk berhenti pada satu tempat: bila dapat begitu berarti arus telah berhenti, tak ada arus lagi. Dan listrik tak dapat hilang begitu saja. Jadi jumlah listrik yang masuk ke A harus sama dengan jumlah listrik yang keluar dari A.

Untuk titik A:

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4 \text{ atau}$$

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$



Gambar 1-10 Arus yang masuk sama dengan arus keluar

Jadi rumus hukum Kirchhoff I:

$$\boxed{\sum I = 0} \dots\dots\dots (1-24)$$

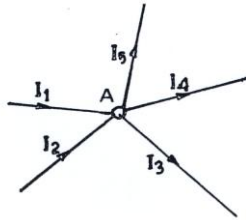
Dengan perkataan, hukum Kirchhoff I berbunyi:

Jumlah aljabar semua arus dalam titik percabangan itu sama dengan nol.

Contoh:

Dalam gambar 3-38, arus masuk ke titik percabangan A lewat dua kawat, I_1 dan I_2 . Dari titik A arus mengalir ke 3 lampu : I_3 , I_4 , dan I_5 . Maka bila $I_1 = 3 \text{ A}$, $I_2 = 4 \text{ A}$, $I_3 = 2 \text{ A}$, $I_4 = 3 \text{ A}$, harga arus I_5 dapat dihitung.

Menurut hukum Kirchhoff I : $\sum I = 0$



Jadi:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

$$3 + 4 - 2 - 3 - I_5 = 0.$$

(Arus yang masuk ke titik A kita sebut positif dan yang meninggalkannya kita sebut negatif).

Gambar 1- 11

Perhitungan diatas dapat dilakukan sebagai berikut

(arus yang masuk = arus yang keluar):

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5$$

$$3 + 4 = 2 + 3 + I_5$$

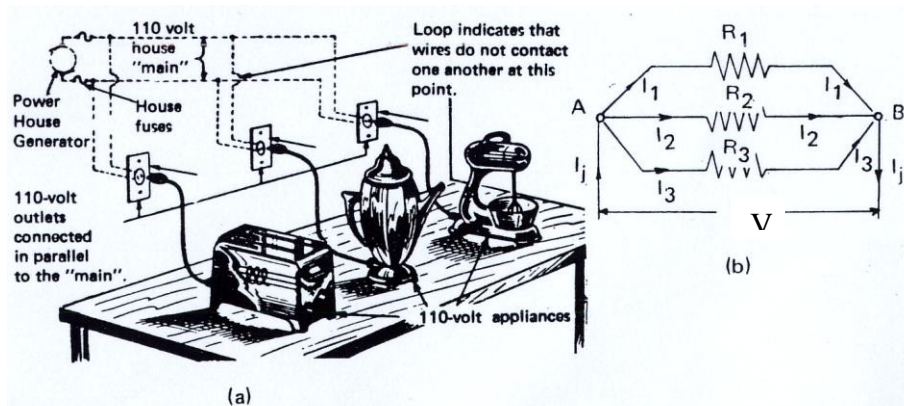
$$7 = I_4 + 5$$

$$I_5 = 7 - 5 = 2 \text{ A, meninggalkan titik percabangan.}$$

9. HUBUNGAN JAJAR

Apabila beberapa pemakai (alat listrik) bersama-sama dihubungkan pada satu tegangan (misalnya pada tegangan jala-jala, ialah tegangan antara kawat-kawat yang mengantar arus ke rumah kita), seperti dalam gambar 1-12, maka tegangan alat-alat itu semua sama. Hubungan semacam ini disebut: *hubungan jajar*.

Semua alat listrik pada umumnya dihubungkan jajar kepada tegangan yang tersedia, kecuali bila lain permintaan orang.



Gambar 1-12. a. Beberapa pemakai dihubung jajar pada tegangan jala-jala
b. Bagan hubungannya

Sesuai dengan hukum Kirchhoff I, dalam gambar 1-12a, dalam titik percabangan A, jumlah aljabar arus sama dengan nol:

$$I_{\text{jumlah}} - I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_{\text{jumlah}} = I_1 + I_2 + I_3$$

Menurut hukum Ohm: arus dalam masing-masing cabang:

$$I_1 = \frac{V}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3}$$

Jadi:
$$I_j = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Harga ketiga tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 dapat kita ganti dengan satu tahanan pengganti: R_p , yang dapat memenuhi persamaan terakhir di atas.

Jadi dapat kita tulis:

$$I_j = \frac{V}{R_p}$$

Dengan memasukkan ini ke dalam persamaan terakhir di atas, kita hasilkan:

$$\frac{V}{R_p} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Kalau kedua ruas persamaan ini kita bagi dengan U, akan kita dapatkan:

$$\boxed{\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad \dots\dots\dots (1-25a).$$

Atau dapat ditulis:

$$\boxed{\frac{1}{R_p} = \sum \frac{1}{R}} \quad \dots\dots\dots (1-25b).$$

Dengan kata-kata:

Dalam satuan rangkaian jajar nilai kebalikan tahanan pengganti sama dengan jumlah nilai kebalikan tahanan-tahanan yang dihubungkan jajar. Karena $1/R = G$, yang disebut daya-antar, maka rumus(1-25) dapat ditulis sebagaiberikut :

$$G_p = G_1 + G_2 + G_3 \quad (1-26)$$

$$G_p = \sum G \quad (1-27)$$

Dengan perkataan :

Daya antar pengganti dalam rangkaian jajar itu sama dengna jumlah daya antar masing-masing cabang.

Contoh :

Bila harga tahanan dalam cabang-cabang dalam gambar 1-12a ialah:

$R_1 = 4$ ohm, $R_2 = 1,5$ ohm, $R_3 = 2,4$ ohm, maka:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{4} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{2,4}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{3}{12} + \frac{8}{12} + \frac{5}{12}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{16}{12}$$

$$R_p = \frac{12}{16} = 0,75 \text{ ohm}$$

Dari uraian diatas dapat kita simpulkan :

1. Dalam rangkaian jajar tegangan tiap-tiap alat listrik yang dihubungkan sama
2. Arus jumlah sama dengan arus cabang
3. Nilai tahanan jumlah (tahanan pengganti) lebih kecil daripada harga tahanan cabang yang terkecil

Contoh lain:

1. Tiga buah pemakai listrik yang harga tahanannya masing-masing 10 ohm, 12 ohm, dan 60 ohm, dihubungkan jajar kepada tegangan 60 volt. Hitunglah :
 - a. kuat arus dalam tiap pemakai
 - b. Arus yang dipakai (arus jumlah)
 - c. Tahanan jumlah (tahanan pengganti) rangkaian.

Jawab :

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{60}{10} = 6 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{60}{12} = 5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{60}{60} = 1 \text{ A}$$

$$I_j = I_1 + I_2 + I_3 = 12 \text{ A}$$

$$\text{Tahanan pengganti } R_p = \frac{V}{I_1} = \frac{60}{12} = 5 \text{ ohm}$$

Tahanan pengganti dapat juga dihitung dengan menggunakan rumus tahanan jajar:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$= \frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \frac{1}{60}$$

$$= \frac{6+5+1}{60}$$

$$= \frac{12}{60} = 5 \text{ ohm}$$

2. Tiga buah penahan (resistor) masing-masing:
20 ohm, 25 ohm, 50 ohm, dihubungkan jajar. Arus dalam penahan 25 ohm sebesar 4 amper.

Berapakah :

- Arus dalam penahan yang lain
- Arus jumlah
- Tahanan pengganti

Jawab :

Tahanan-tahanan :

$$R1 = 20 \text{ ohm}$$

$$R2 = 25 \text{ ohm}$$

$$R3 = 50 \text{ ohm}$$

$$I2 = 4 \text{ Amper}$$

- Tegangan

$$V = I2 \times R2 = 4 \times 25 = 100 \text{ volt}$$

$$I1 = \frac{V}{R1} = \frac{100}{20} = 5 \text{ amper}$$

$$I3 = \frac{V}{R3} = \frac{100}{50} = 2 \text{ amper}$$

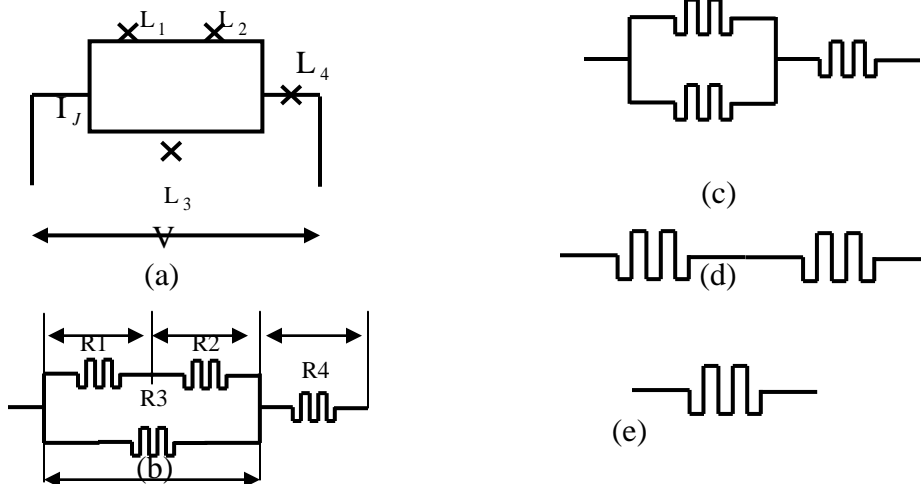
- Arus jumlah = jumlah arus tiap bagian

$$Ij = I1 + I2 + I3 = 5 + 4 + 2 = 11 \text{ Amper}$$

- Tahanan pengganti (R_p)

$$R_p = \frac{V}{I_j} = \frac{100}{11} = 9,09 \text{ ohm}$$

10. HUBUNGAN CAMPUR (DERET-JAJAR)



Gambar 1-13.a memperlihatkan hubungan campuran yang sederhana. Lampu L_1 dan L_2 dihubugkan deret. L_3 dihubungkan jajar dengan rangkaian deret L_1 - L_2 . lampu L_4 dihubungkan deret dengan rangkaian jajar L_1 - L_2 dan L_3 . gambar 1-13 memperlihatkan

bagan rangkaiannya. Dalam menyelesaikan soal-soal seperti ini, digunakan pedoman-pedoman hubungan deret dan jajar. Untuk contoh dibawah ini:

1. Nilai tahanan lampu dalam gambar 1-13, misalnya:

$$R1 = 20 \text{ ohm}$$

$$R2 = 30 \text{ ohm}$$

$$R3 = 50 \text{ ohm}$$

$$R4 = 75 \text{ ohm}$$

Tegangan antara A-D : $V_{AD} = 100$ volt.

- a. kita tentukan dulu tahanan pengganti rangkaian.

Tahanan pengganti untuk rangkaian deret I1-I2 :

$$R1-2 = R1+R2$$

$$= 20 + 30$$

$$= 50 \text{ ohm. (lihat gambar 1-13c)}$$

R1-2 dan R3 dalam hubungan jajar, jadi:

$$\frac{1}{R1-2-3} = \frac{1}{R1-2} + \frac{1}{R3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{50} = \frac{2}{50}$$

$$R1-2-3 = \frac{50}{2} = 25 \text{ ohm}$$

Ini merupakan tahanan antara A-C

R1-2-3 dan R4 dalam hubungan deret maka :

$R1-2-3-4 = R1-2-3 + R4 = 25 + 75 = 100$ ohm, ini tahanan antara A-D, merupakan tahanan pengganti rangkaian : R_{AD} (lihat gambar 1-13e).

- b. Kini kita tentukan kuat arus dan tinggi tegangan pada tiap penahan lampu.

$$I \text{ jumlah} = \frac{V_{AD}}{R_{AD}} = \frac{100}{100} = 1 \text{ amper}$$

$$V_{AC} = I_j \times R_{AC} = 1 \times 25 = 25 \text{ volt.}$$

$$V_{CD} \text{ CD} = I_j \times R_{CD} \text{ atau } V_{AD} - V_{CD} = 100 - 25 = 75 \text{ volt.}$$

Kuat arus dalam L1 (R1) sama dengan arus dalam L2 (R2), karena dalam hubungan deret:

$$I_1 = \frac{V_{AC}}{R_{AC}} = \frac{25}{50} = 0,5 \text{ amper}$$

$$I_3 = I_j - I_2 = 1 - 0,5 \text{ amper.}$$

$$I_4 = I_j = 1 \text{ amper}$$

$$V_{AB} = I_1 \times R1 = 0,5 \times 20 = 10 \text{ volt}$$

$$V_{BC} = I_1 \times R2 = 0,5 \times 30 = 15 \text{ volt}$$

$$V_{AC} = I_3 \times R3 = 0,5 \times 50 = 25 \text{ volt.}$$

$$V_{AC} \text{ dapat pula dicari melalui } V_{AD} - V_{CD} = V_{AC}$$

Jadi :

Arus rangkaian : $I_j = 1$ amper, tegangan rangkaian = 100 volt.

Arus lampu L1: $I_1 = 0,5$ amper, tegangan L1 = 10 volt

Arus lampu L2: $I_2 = 0,5$ amper, tegangan L2 = 15 volt

Arus lampu L3: $I_3 = 0,5$ amper, tegangan L3 = 25 volt

Arus lampu L4: $I_4 = 1$ amper, tegangan L4 = 75 volt

2. Empat buah lampu dihubungkan seperti dalam gambar 1-13. Tiap-tiap lampu mempunyai ukuran yang sama ialah $6 \text{ V}/1 \text{ A}$. $E_{AD} = 12 \text{ V}$. (3-40a).
- berapakah kuat arus yang mengalir dalam tiap lampu.
 - Beapakah tinggi tegangan tiap lampu.
 - Lampu yang manakah yang paling terang, dan yang manakah yang paling suram nyalanya:

Jawab :

Tahanan tiap lampu $R_L = \frac{V}{I} = \frac{6}{1} = 6 \text{ ohm}$ (dihitung dari ukurannya : $6\text{V}/1\text{A}$).

Tahanan jumlah harus dihitung satu persatu.

$R_{1-2} = R_1 + R_2 = 6 + 6 = 12 \text{ ohm}$ (deret).

$$\frac{1}{R_{1-2-3}} = \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{3}{12}$$

$$R_{1-2-3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ ohm}$$

$R_{1-2-3-4} = R_{1-2-3} + R_4 = 4 + 6 = 10 \text{ ohm}$.

Kini kita hitung kuat arus dalam tiap lampu.

$$\text{Arus jumlah } I_j = \frac{V}{R_j} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ amper}$$

Kuat arus dalam lampu L_4 : $I_4 = I_j = 1,2 \text{ amper}$

Untuk menghitung arus bagian harus dicari dulu tegangan tiap bagian.

$V_4 = I_4 \times R_4 = 1,2 \times 6 = 7,2 \text{ volt}$.

$V_{1-2} = V_3$ karena dalam hubungan jajar.

$V_3 = V - V_4 = 12 - 7,2 = 4,8 \text{ volt}$.

Arus $L_1 =$ arus L_2 , karena dalam hubungan deret.

$$I_1 = \frac{V_{1-2}}{R_{1-2}} = \frac{4,8}{12} = 0,4 \text{ amper}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{4,8}{6} = 0,8 \text{ amper}$$

$V_1 = I_1 \times R_1 = 0,4 \times 6 = 2,4 \text{ volt}$

$V_1 = V_2 = 2,4 \text{ volt}$, sebab tahanannya sama.

Dari hasil perhitungan, jawab

- Arus tiap-tiap lampu :

$$I_1 = 0,4 \text{ amper}$$

$$I_2 = 0,4 \text{ amper}$$

$$I_3 = 0,8 \text{ amper}$$

$$I_4 = 1,2 \text{ amper}$$

- Tegangan tiap-tiap lampu :

$$V_1 = 2,4 \text{ volt}$$

$$V_2 = 2,4 \text{ volt}$$

$$V_3 = 4,8 \text{ volt}$$

$$V_4 = 7,2 \text{ volt}$$

- c. L1 dan L2 paling suram , L3 agak terang, L4 paling terang, sehingga mungkin akan putus sebab tegangan maupun arusnya melebihi ketentuan lampu.

11. USAHA DAN DAYA

11.1. Usaha dan daya mekanik.

Untuk memindahkan benda dari satu tempat ke tempat lain, atau mengangkatnya ke suatu ketinggian, kita harus melakukan usaha. Dan untuk melakukan usaha ini diperlukan gaya (force = karcht).

Gaya yang kita gunakan untuk memindahkan benda itu selain bergantung kepada berat benda, juga bergantung kepada besar gesekan. Bila benda yang harus dipindahkan itu berada di atas roda, jadi kecil gesekan roda terhadap tanah, gaya yang diperlukan lebih kecil daripada gaya yang diperlukan untuk memindahkan benda yang sama itu, tetapi harus diseret di atas tanah

Berat benda itu merupakan gaya, yaitu gaya tarik bumi terhadap benda itu. Jadi kalau kita menaikkan (mengangkat) benda, kita harus mengeluarkan gaya paling sedikit sama tetapi berlawanan dengan gaya tarik bumi (berat benda).

Apabila dua benda, yang satu dua kali lebih berat daripada yang lain harus dinaikkan ke ketinggian yang sama, maka usaha yang kita lakukan untuk mengangkat benda yang lebih berat, dua kali lebih besar daripada untuk benda yang lebih ringan tadi.

Dua benda yang sama beratnya, yang satu kita naikkan setinggi 1 m yang lain 2 m. usaha yang dilakukan untuk benda yang kedua, dua kali lebih besar daripada yang untuk benda pertama.

Jadi dapat kita simpulkan bahwa:

Usaha berbanding lurus dengan gaya dan jarak.

Dalam rumus : $W = F \times S$ (1 – 29)

W = usaha dalam satuan kgm.

F = gaya dalam satuan kg.

S = jarak dalam satuan m.

Untuk menaikkan benda tersebut diperlukan waktu. Makin singkat waktu yang diperlukan oleh pesawat pengangkat (motor listrik), makin besar kemampuan pesawat itu. Kemampuan ini disebut daya.

Daya mekanik suatu perkakas ialah usaha mekanik dalam kgm yang dilakukan perkakas itu tiap sekon.

Dalam rumus :

$$P = \frac{W}{t}$$

P = daya dalam satuan kgm/sekond.

W = usaha dalam kgm.

t = waktu dalam sekon.

Satuan daya yang lebih besar adalah : daya kuda, disingkat dk; dalam bahasa inggris : horse power (hp) dan dalam bahasa belanda : paardekract (pk)

1 daya kuda = 75 kgm/sekond.

11.2. Usaha dan daya listrik.

Selain usaha dan daya mekanik ada juga usaha dan daya kimiawi, panas, listrik, dan sebagainya. Dalam prinsipnya cara menentukan usaha dan daya listrik itu sama dengan cara menentukan usaha dan daya mekanik. sebuah lampu pijar dihubungkan pada tegangan V volt. Electron bebas pindah dari kutub negative lewat lampu ke kutub positif. Untuk memindahkan electron (banyak muatan listrik) ini diperlukan usaha listrik:

$$\boxed{W = V \times Q} \dots\dots\dots 1- 31$$

W = usaha listrik dalam Volt Coloumb atau Joule (J).

V = tegangan dalam volt.

Q = banyak listrik dalam Coulomb.

Karena $Q = I \times t$, maka :

$$W = V \times Q = V \times I t$$

$$W = V \times Q = V \times I t.$$

$$\boxed{W = V \times I \times t} \dots\dots\dots 1- 32a$$

Atau

$$\boxed{W = P \times t} \dots\dots\dots 1 - 32b$$

Karena $V = I \times R$, maka :

$$W = V \times I \times t = I \times R \times I \times t$$

$$\boxed{W = I^2 \times R \times t} \dots\dots\dots .1 - 33$$

W = usaha dalam satuan watt-sekon atau Joule (J)

V = tegangan dalam volt.

I = arus dalam amper.

R = tahanan dalam ohm.

T = waktu dalam sekon.

Dari rumus 1 – 30 dan 1 – 32 kita dapat menulis : Daya listrik :

$$P = \frac{W}{t} = (V \times I \times t)/t$$

$$\boxed{P = V \times I} \dots\dots\dots(1 - 34).$$

Atau :

$$P = I \times R \times I$$

$$\boxed{P = I^2 \times R} \dots\dots\dots(1 - 35).$$

P = daya listrik dalam satuan watt (W).

V = tegangan dalam volt.

I = arus dalam amper.

R = tahanan dalam ohm.

Dari persamaan : $P = V \times I$, kita dapat menulis :

$$P = V \times I \times R/R$$

$$P = (V \times V) / R$$

$$P = V^2 / R \quad (1-36)$$

- 1 kilowatt = 1 kw = 1000 W.
- 1 Megawatt = 1 MW = 1000 kW = 10⁶ W.
- 1 miliwatt = 1 mW = 0,001 W.
- Satuan usaha listrik:
- 1 kilowatt-jam = 1 kWh = 3.600.000 watt sekon.
- 1 Megawatt-jam = 1 MWh = 1000 kWh.

11.3. Usaha panas

Apabila sebuah benda kita panasi, maka benda itu naik suhunya. Jika benda yang dipanasi itu kecil, untuk menaikkan suhunya, banyak panas yang harus kita berikan kepadanya pun kecil. Kalau benda yang besar, banyak panas yang harus diberikan besar pula. Satuan banyak panas ialah : kalori. Banyak panas 1 kalori ialah banyak panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air 1 gram (1 cm³) setinggi 1°C. misalkan kita berikan kepada air 1 liter (1 liter = 1 kg), panas 2 kilo-kalori (1 kkal = 1000 kal). Besar kenaikan suhu air itu : $\frac{2000}{1000} \times 1^\circ\text{C} = 2^\circ\text{C}$.

Banyak panas Q yang diperlukan untuk menaikkan 1°C suhu air 1kg tidak sama dengan panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu tembaga yang sama beratnya (1 kg). banyak kkal yang diperlukan untuk menaikkan 1°C suhu 1 kg bahan itu disebut : panas jenis (pj) bahan itu.

Misalnya : pj : air ialah 1, udara 0,238 dan tembaga 0.095.

Contoh:

1. Air 3 liter (3 kg) dipanasi dari 30°C menjadi 50°C (lihat gambar 3-48). Berapakah banyak panas yang diberikan ?

Jawab:

Untuk menaikkan 1°C suhu air 3 kg diperlukan : 3 X 1 kkal = 3 kkal.

Untuk menaikkan 20°C diperlukan 3 X 20 kkal = 60 kkal.

2. Berapakah banyak panas yang diperlukan untuk menaikkan 10°C suhu 10 kg tembaga? Panas jenis tembaga = 0, 095.

Jawab:

Banyak panas yang diperlukan : Q = 10 X 0,095 X 10 = 9,5 kkal.

Jadi:

Banyak panas = banyak benda (kg) X panas jenis X kenaikan suhu (°C)

Dalam rumus :

$$Q = B \times pj \times (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(1 - 37)$$

- Q = banyak panas.
- B = berat benda
- Pj = panas jenis
- T1 = suhu rendah
- T2 = suhu tinggi

11.4. Hubungan antara usaha mekanik, panas dan listrik.

Tenaga atau energy itu tidak dapat hilang begitu saja. Apabila suatu tenaga hilang, tentu harus timbul energy lain, artinya energy yang kelihatannya hilang tadi sesungguhnya berubah menjadi energy yang baru.

Batu timbangan B yang telah diketahui beratnya dijatuhkan dari suatu ketinggian yang diketahui sehingga tali batu timbangan itu tertarik melalui rol R, memutar gelendong G. gelendong G berputar sehingga singkup – singkup S yang dipasang pada poros gelendong berputar di dalam air yang telah diketahui berat dan suhunya. Karena putaran singkup ini air naik suhunya. Kenaikan suhu ini sama dengan energy akibat jatuhnya batu timbangan tadi dari ketinggian yang telah diketahui. Sehingga didapatkan persamaan usaha mekanik dan usaha panas.

Dalam percobaan – percobaan para ahli ilmu fisika, ditemukan bahwa:

Usaha panas 1 kkal = usaha mekanik 427 kgm.

Usaha mekanik 1 kgm = 9,81 joule.

Dari ini kita dapatkan :

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{9,81} \text{kgm} = 0,10193 \text{ kgm} = 0,102 \text{ kgm}$$

$$1 \text{ kgm} = 1/427 \text{ kkal} = 0,002342 \text{ kkal.}$$

$$1 \text{ Joule} = 0,102 \times 0,002342 \text{ kkal} = 0,00024 \text{ kkal} = 0,24 \text{ kal.}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ watt-sekon} = 3600 \text{ joule} = 3600 \times 0,00024 \text{ kkal} = 0,864 \text{ kkal} = 864 \text{ kal.}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Joule} = 3600 \times 0,102 = 367,2 \text{ kgm.}$$

$$1 \text{ Watt} = 864/3600 \text{ kal/sekon} = 0,24 \text{ kal/sekon.}$$

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule/sekon} = 0,10193 \text{ kgm/sek} = 0,102 \text{ kgm/sek.}$$

$$1 \text{ dk} = 75 \text{ kgm/sek} = 75/0,10193 \text{ watt} = 736 \text{ watt.}$$

$$1 \text{ kW} = 1000/736 \text{ dk} = 1,36 \text{ dk.}$$

Karena 1 Joule = 0,24 kal, dari rumus (3 – 33) dapat kita tulis:

$W = 0,24 \times I \times R \times t \text{ kalori}$(1 – 38)
--	---------------

Jadi panas yang dibangkitkan oleh arus listrik itu :

$Q = 0,24 \times I \times R \times t \text{ kalori}$(1 – 39)
--	---------------

Persamaan (1 – 39) ini disebut hukum Joule.

Dalam percobaannya, Joule menggunakan sebuah bejana gelas yang diisi air 1 Liter dan ditutup. Di dalam air direndam sebuah tahanan pilin (spiral resistor). Tahanan ini dipasang antara dua batang pengantar yang dipasang pada tutup. Pada tutup dipasang juga sebuah pengukur suhu (termometer) yang ujungnya sampai di dalam air. Semua itu dikelilingi dengan bahan penyekat panas sehingga panas tidak dapat keluar.

Ke dalam tahanan-pilin dialirkan arus tertentu, maka karena panas yang dibangkitkannya, suhu air naik. Dalam percobaan Joule menemukan bahwa, bila arus dinaikkan 2x, panas yang ditimbulkan dalam waktu yang sama naik 4x. Jika arus dinaikkan 3x, panas yang timbul naik 9 x, jika arus dinaikkan 4x, panasnya naik 16x, dan seterusnya.

Jadi:

Panas yang dibangkitkan berbanding lurus dengan kwadrat kuat arus. Dan dalam percobaan selanjutnyadidapatkan bahwa:

Panas yang dibangkitkan berbanding lurus dengan tahanan dan waktu. Kesimpulan di atas itu semua menghasilkan hukum joule di atas.

Contoh :

1. Berapakah besar daya motor listrik yang dipakai untuk menaikkan balok seberat 100 kg setinggi 50 meter dalam waktu 20 sekon?

Jawab :

Daya mekanik yang diperlukan :

$$P = w/t = 100 \times 50 / 20 = 250 \text{ kgm/sek.}$$

$$1 \text{ kgm/sek} = 9,81 \text{ watt.}$$

Sehingga daya motor listrik :

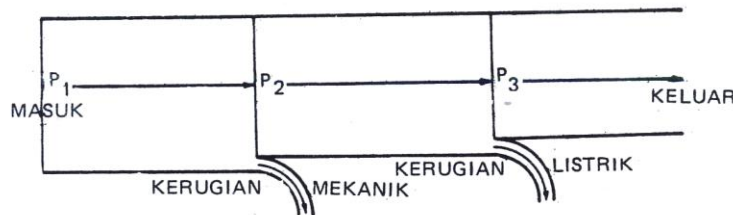
$$P = 250 \times 9,81 \text{ watt} = 2452,5 \text{ watt} = 2,4525 \text{ KW.}$$

12. DAYA GUNA ATAU EFISIENSI (RENDEMEN)

Tiap kali kita mengubah suatu macam usaha menjadi usaha lain, selalu kita alami kerugian. Misalnya:

1. Mengubah usaha mekanik yang diberikan oleh motor diesel, diubah di dalam dinamo (generator) menjadi energi listrik,
2. Mengubah usaha listrik menjadi panas. Mengubah usaha listrik menjadi usaha kimiawi, dalam pengisian baterai akumulator oleh generator arus searah.
3. Dalam pelaksanaan perubahan ini semua, kita alami kerugian. Dalam perubahan yang pertama di atas terjadi kerugian pada bantalan. Di sini sebagian dari tenaga yang masuk, karena gesekan diubah menjadi panas. Dan di dalam lilitan, sebagian dari tenaga listriknya berubah menjadi panas.

Dalam perubahan kedua, terjadi kerugian karena sebagian dari panasnya hilang memancar tak berguna. Dalam perubahan ketiga, terjadi kerugian karena sebagian dari tenaga listriknya berubah menjadi panas. Perbandingan antara daya yang diberikan oleh pesawat yang dapat berguna dan yang dimasukkan ke dalam pesawat itu disebut : *daya guna atau efisiensi (rendemen)*.



Gambar 1-14

Untuk dapat lebih mudah memahami hal ini, lihatlah gambar 1-14. Daya yang masuk P_1 . Karena kerugian mekanik, P_1 dan P_2 yang lebih kecil. P_2 menjadi P_3 yang lebih kecil lagi karena keruguan listrik. P_3 merupakan daya yang berguna yang diberikan oleh pesawat (di sini : pesawat listrik).

Efisiensi pesawat ini ialah :

$$\eta \text{ (eta)} = \frac{P_3}{P_1} \dots\dots\dots (1-40a).$$

Selain dalam bilangan pecahan, efisiensi juga dinyatakan dalam persen.
Jadi :

$$\eta \text{ (eta)} = \frac{P_3}{P_1} \times 100\% \dots\dots\dots (1-40b).$$

Contoh :

1. Pada papan nama sebuah motor listrik tertulis :

$$\begin{aligned} \text{HP} &= 1 \\ \text{V} &= 120 \\ \text{A} &= 8 \end{aligned}$$

Apakah arti tulisan tersebut ? berapakah rendemen motor itu ?

Jawab :

- HP = 1 artinya : motor mampumemberikan daya 1 daya kuda.
V = 120 artinya : motor memerlukan tegangan 120 volt.
A = 8 artinya : untuk memberikan daya 1 dk, diperlukan arus sebesar 8 amper.

$$1 \text{ dk} = 736 \text{ watt.}$$

$$\text{Daya yang perlukan } 120 \times 8 = 960 \text{ watt.}$$

$$\eta = \frac{736}{960} \times 100\% = 77\%.$$

2. Sebuah motor diesel 5 dk, digunakan untuk menggerakkan dinamo. Dinamo dapat memberikan arus sebesar 25 amper pada tegangan 120 volt.

Berapa :

- a. Kerugian dalam dynamo ?
- b. Rendemen dynamo ?

Jawab :

$$\text{Daya motor diesel } 5 \text{ dk} = 5 \times 736 = 3680 \text{ watt.}$$

$$\text{Daya yang dihasilkan dynamo} = 120 \times 25 = 3000 \text{ watt.}$$

- a. Kerugian dalam dynamo ; $3680 - 3000 = 680 \text{ watt.}$
- b. Rendemen dinamo ; $\frac{3000}{3680} \times 100\% = 82\%.$

3. Sebuah tungku listrik digunakan untuk memasak air sebanyak 1 liter selama 15 menit dari suhu 25°C menjadi 100°C . Panas yang memancar (hilang) 25%.

Tungku dihubungkan pada tegangan 120 volt. Berapa :

- a. Panas yang hilang ?
- b. Arus listrik yang diperlukan ?
- c. Biaya masak, kalau 1 kWh = Rp. 10,-

Jawab :

a. Panas yang diperlukan memasak air :

$$Q_{\text{air}} = B \times p_j \times (T_2 - T_1).$$

$$Q_{\text{air}} = 1 \times (100 - 25) \times 1 = 75 \text{ k.kal} = 75.000 \text{ kal.}$$

Panas yang hilang 25%, berarti panas yang harus ditimbulkan : $\frac{100}{75} \times$

panas yang berguna :

$$Q = \frac{100}{75} \times 75.000 = 100.000 \text{ kalori.}$$

Panas yang memancar = $Q - Q_{\text{air}} = 100.000 - 75.000 = 25.000$ kalori.

b. Menurut rumus $Q = 0,24 U \times I \times t$ kal

Arus listrik yang diperlukan :

$$I = \frac{Q}{0,24 \times V \times t}$$

$$= \frac{100.000}{0,24 \times 120 \times 900} = \text{amper} = 3,86 \text{ A.}$$

c. $1 \text{ kWh} = 864 \text{ k.kal} = \frac{100}{864} \text{ kWh.}$

Jadi biayanya = $\frac{100}{864} \times \text{Rp. } 10,- = \text{Rp. } 1,16.$

4. Untuk mengangkat air setinggi 10 meter diperlukan alat penggerak dan pompa. Sebagai alat penggerak digunakan motor listrik dan sebagai pompa digunakan pompa pusingan. Efisiensi motor listrik = 80% dan efisiensi pompa = 60%. Motor dihungkan pada tegangan 125 Volt dan mengambil arus 8 amper. Lama pompa : 1 jam.

Berapa :

- Usaha motor listrik yang berguna.
- Usaha pompa yang dapat berguna untuk mengangkat air.
- Banyaknya air yang dapat diangkat (meter kubik).

Jawab :

- Usaha motor listrik selama 1 jam;\
 $W = 125 \times 8 \times 1 = 1000 \text{ watt jam} = 1 \text{ kWh.}$
 Usaha motor listrik yang berguna :
 $80\% \times 1 \text{ kWh} = 0,8 \text{ kWh.}$
- Usaha pompa yang berguna 60% dari usaha motor listrik yang berguna, jadi :
 $W_{\text{pompa}} = 0,6 \times 0,8 \text{ kWh} = 0,48 \text{ kWh.}$

- d. Menurut daftar satuan-satuan usaha, $1 \text{ kWh} = 367200 \text{ kgm.}$

Sehingga $0,48 \text{ kWh} = 0,48 \times 36720 \text{ kgm} = 176256 \text{ kgm.}$

Karena $W = K \times S$ maka air yang dapat diangkat :

$$B = \frac{w}{S} = \frac{176256 \text{ kg}}{10} = 17625,6 \text{ kg.}$$

Jadi banyak air yang dapat diangkat setinggi 10 m ialah : $17625,6 \text{ kg} = 17625,6 \text{ liter} = 17,6256 \text{ m}^3$. Dari beberapa contoh diatas dapatlah diambil kesimpulan, bahwa efisiensi (η) sesuatu alat max. = 100%, tidak mungkin lebih dari itu. Dalam kenyataan, tidak ada sesuatu alat yang mempunyai efisiensi 100%. Hanya untuk memudahkan perhitungan kadang-kadang kerugian dianggap nol (tidak ada).

13. HUBUNGAN SUMBER ARUS.

Untuk mendapatkan tegangan dan arus yang sesuai dengan yang diperlukan untuk pemberian tenaga kepada alat-alat listrik, maka dilakukan macam-macam hubungan sumber arus.

Kita kenal 3 macam hubungan :

- a. Hubungan seri.
- b. Hubungan paralel.
- c. Hubungan campuran (deret jajar).

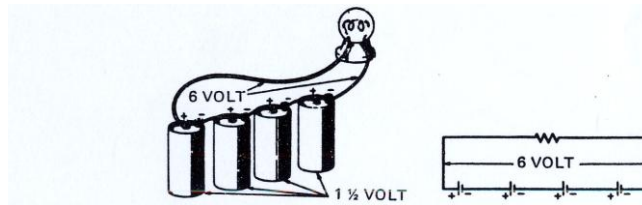
Kumpulan sumber arus (unsure kering atau basah) yang sudah dihubungkan seperti a, b, dan, c di atas, disebut : *Baterai*. Sumber arus yang digunakan dalam rangkaian ini harus sama dengan ggl maupun tahanan dalamnya.

13.1. Hubungan Seri

Yang dimaksud dengan hubungan deret sumber arus, ialah cara penghubungan seperti dalam Gb. 1-15. Kutub positif dihubungkan dengan kutub negatif, begitu seterusnya, sebanyak unsur yang ingin kita deretkan. Akhirnya didapatkan ujung positif dan negatif. Ujung positif disebut kutub positif baterai dan begitupula dengan ujung negatifnya disebut kutub negatif baterai. Ujung-ujung kutub baterai dihubungkan dengan tahanan luar, maka mengalirlah arus ketahanan luar itu.

Arus yang dikeluarkan baterai, disebut arus baterai.

Jumlah ggl yang terdapat pada baterai disebut ggl baterai, jumlah tahanan dalam baterai, disebut tahanan-dalam baterai.



Gambar 1-15

Misalkan : jumlah unsur yang dideretkan = d.

Ggl tiap unsur = e.

Tahanan dalam tiap unsur = rd.

Tahanan luar = Rl.

Maka : arus baterai (I bat) dapat dihitung.

Sesuai dengan rumus sumber arus :

$$I = \frac{E}{Rd + Rl} \dots\dots\dots(1-41)$$

Maka untuk baterai ini :

$$I = \frac{E_{bat}}{Rd. bat + Rl.}$$

$$E bat = d \times e$$

Rd. bat. = d x rd, sehingga rumus untuk hubungan ini :

$$I = \frac{d \times E}{d \times rd + Rl} \text{ amper}$$

d = jumlah unsur dalam hubungan seri

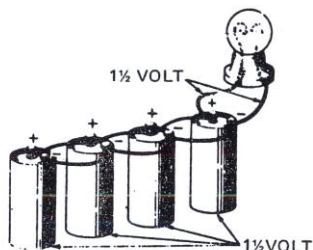
e = ggl tiap unsur, dalam volt.

Rd = tahanan dalam tiap unsur, dalam ohm.

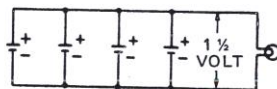
Rl = tahanan luar, dalam ohm.

13.2. Hubungan Pararel.

Yang dimaksud dengan hubungan pararel adalah bila beberapa sumber arus (unsur) itu dihubungkan berjajar-jajar. Di satu sisi kutub-kutub negative juga dihubungkan menjadi satu. Kedua ujung penyatuan ini dihubungkan dengan tahanan luar (RI) seperti bagan dalam gambar 1-16.



Gambar 1-16



Ggl baterai = ggl unsur = e, karena hubungan pararel.

Tahanan dalam baterai : $R_d = \frac{rd}{j}$

j = jumlah unsur yang dihubungkan jajar.

rd = tahanan dalam tiap unsur, sehingga arus baterai :

$$I = \frac{e}{(d/j \times rd) + RI} \dots\dots\dots (1-42)$$

13.3. Hubungan Deret Jajar.

Untuk mendapatkan arus maupun tegangan yang cukup, maka penyambungan unsur (sumber arus) dibuat campuran atau dikenal dengan samb. deret-jajar, seperti dalam gambar 1-17. Rumus yang dipakai untuk hubungan ini, tidak meninggalkan rumus-rumus dasar deret dan jajar.

Jumlah unsur yang dihubungkan deret = d.

Jumlah deretan (rangkaiian deret) yang dijajarkan = j.

Jumlah unsur seluruhnya = d x j = n.

Ggl baterai = d x ggl unsur.

Tahanan dalam baterai = $\frac{d}{j}$ x tahanan dalam unsur.

Sehingga arus baterai :

$$I = \frac{E.bat}{Rd. bat + RL} = \frac{d \times e}{(d/j \times rd) + RL} \dots\dots\dots (1-43).$$

Rumus di atas dapat dipakai baik untuk hub. Seri maupun paralel. Misalnya : $d = 1$ dan $j = 1$, maka rumus untuk satu unsur. Kalau $j = 1$, maka rumus ini menjadi rumus untuk baterai dengan hubungan seri, seperti di bawah ini :

$$I = \frac{d \times e}{\left(\frac{d}{j} \times rd\right) + RL} = \frac{d \times e}{\left(\frac{d}{1} \times rd\right) + RL} = \frac{d \times e}{(d \times rd) + RL}$$

Jika $d = 1$, maka rumus 1, maka rumus ini menjadi rumus untuk baterai dengan hubungan paralel, seperti di bawah ini :

$$I = \frac{d \times e}{\left(\frac{d}{j} \times rd\right) + RL} = \frac{e}{\left(\frac{1}{j} \times rd\right) + RL}$$

Contoh :

1. Sebuah baterai terdiri dari 4 unsur yang dihubungkan seri. Ggl tiap unsur 1,5V. Tahanan dalamnya 0,1 ohm. Baterai dihubungkan dengan tahanan luar 2,6 ohm. Berapa :

- Arus baterai ?
- Kehilangan dalam tegangan ?
- Tegangan jepit baterai ?

Jawab :

Menurut rumus :

$$I = \frac{d \times e}{d \times rd + RL}$$

$$V_r = I \times R_d = 2 \times (4 \times 0,1) = 2 \times 0,4 \text{ volt} = 0,8 \text{ volt.}$$

$$V = I \times R_l = 2 \times 2,6 = 5,2 \text{ volt.}$$

2. buah sumber arus disusun menjadi baterai. Jumlah unsur yang dihubungkan deret : 4 buah ggl tiap sumber arus : 1,5 V. Tahanan dalam tiap sumber arus 0,3 ohm. Baterai dihubungkan dengan lampu listrik $\frac{6V}{2A}$. Berapakah :

- Arus yang mengalir dalam lampu .
- Tegangan pada lampu.
- Daya yang diberikan kepada rangkaian luar ?

Jawab :

$$a. \text{ Ggl baterai} = d \times e,$$

$$E_{bat} = 4 \times 1,5 = 6 \text{ V.}$$

$$R_{d.bat} = \frac{d}{j} \times rd = \frac{4}{1} \times 0,3 = 1,2 \text{ ohm.}$$

$$R_l = \frac{6}{2} = 3 \text{ ohm.}$$

$$I_{lampu} = \frac{E_{bat}}{R_{d.bat} + R_l} = \frac{6}{1,2 + 3} = \frac{6}{4,2} = 1,43 \text{ ampere}$$

$$b. \text{ V} = I \times R_l = 1,43 \times 3 = 4,29 \text{ V.}$$

$$\text{Tegangan lampu} = 4,29 \text{ V.}$$

$$c. \text{ Daya luar} = I \times V = 1,43 \times 4,29 = 6,14 \text{ watt.}$$

1. 12 buah unsur kering yang masing-masing ggl-nya 2 V dan tahanan dalamnya 0,1 ohm, harus disusun menjadi baterai untuk memberi arus kepada tahanan luar 0,3

ohm. Bagaimana cara menyusunnya supaya arus yang dihasilkan sebesar-besarnya Berapakah kuat arus yang dihasilkan ?

- Berapakah rendemen baterai ?

Jawab :

Arus yang dihasilkan dapat sebesar-besarnya bila : $R_d \text{ baterai} = R_l$. Dari tahanan dalam baterai untuk hubungan campur :

$$R_d = \frac{d}{j} \times rd.$$

Dan dari dua persamaan di atas, kita dapat menulis :

$$\frac{d}{j} \times rd = R_l.$$

$$\text{Atau : } d \times rd = j \times R_l.$$

Karena : $n = d \times j$ maka $j = \frac{n}{d}$ dan kita dapat menulis :

$$d \times rd = \frac{n}{d} \times R_l.$$

$$\text{Dan : } d^2 \times rd = n \times R_l.$$

$$\text{atau : } d^2 = \frac{nxRl}{rd}$$

jadi :

$$\boxed{d = \sqrt{n \times \frac{Rl}{rd}}} \dots\dots\dots (1-44).$$

d = jumlah unsur yang dihubungkan deret.

n = jumlah unsur semua.

rd = tahanan dalam masing-masing unsur.

R_l = tahanan luar.

Maka jumlah unsur yang dideretkan :

$$= \sqrt{12 \times \frac{0,3}{0,1}} = \sqrt{36} = 6.$$

$$\text{jumlah cabang jajar} = \frac{n}{d} = \frac{12}{6} = 2.$$

$$\text{Ggl. Baterai} = d \times e = 6 \times 2 = 12 \text{ V.}$$

$$\text{Tahanan dalam baterai} = \frac{dxrd}{j} = \frac{6 \times 0,1}{2} = 0,3 \text{ ohm.}$$

$$\text{arus baterai : } I = \frac{12}{0,3 \times 0,3} = 20 \text{ amper.}$$

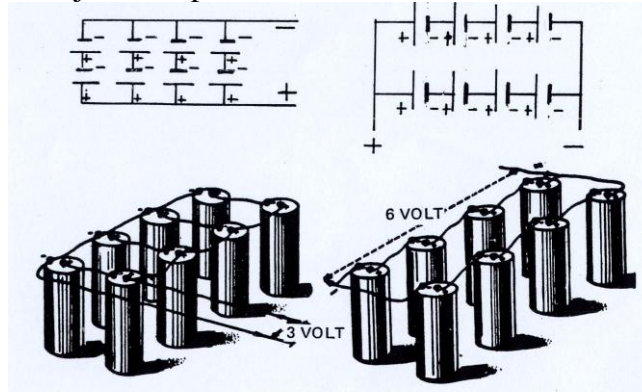
$$\text{Rendemen baterai} = \frac{V}{ggl} = \frac{IxRl}{12} = \frac{20 \times 0,3}{12} = 0,5 = 50\%.$$

14. Hukum Kirchhoff II

Ada kalanya sumber arus yang digunakan dalam rangkaian atau jala-jala, tersusun dari beberapa unsur yang mempunyai ggl yang tidak bersama, begitu pula tahanan dalamnya.

Dalam jala-jala yang rumit kita tak dapat begitu saja menggunakan peraturan hubungan deret dan hubungan sejajar, untuk menyelesaikan persoalan-persoalan. Untuk keperluan ini kita pakai : *hokum kirchoff II*. Untuk memperjelas hokum ini, kita tinjau jala-jala dalam gambar 1-17.

Bila berjalan dari titik a berkeliling sepanjang rangkaian, dengan arah yang sama dengan arah putar jarum jam, sampai kembali di titik A.



Gambar 1-17. Satu rangkaian tertutup terdiri dari dua sumber arus dan dua pemakai

Untuk sementara dalam kedua sumber arus yang ada kita abaikan, kita anggap sama dengan nol. Dari A sampai B, naik E_1 volt (dari titik + ke titik) – berarti titik yang rendah muatan negatifnya kurang elektronnya, naik ke titik yang muatan negatifnya (lebih elektronnya). Bila titik B ke C, kita turun $I \times R$ volt. Dari C ke D kita naik E_2 volt dan dari D sampai A kita turun $I \times R_2$ volt. Arus di semua bagian jala-jala sama kuatnya, karena hanya ada satu jalan arus. Kita sampai di titik A kembali berarti pada ketinggian tegangan semula. Jadi jumlah naik dan turun sama dengan nol, atau jumlah kenaikan $E_1 + E_2$ sama dengan penurunannya $I \times R_1$ dan $I \times R_2$. Persamaan ini disebut *hukum kirchoff II* yang berbunyi :

Dalam rangkaian tertutup, jumlah aljabar ggl sama dengan jumlah aljabar perkalian arus dengan tahanan yang dilalui arus (kehilangan tegangan) dalam rangkaian tertutup itu.

Dalam rumus :

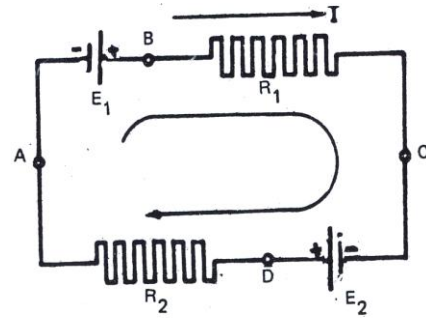
$$\boxed{\Sigma E = \Sigma I X R} \dots\dots\dots (1-45)$$

Dalam penggunaan hukum kirchhoff II untuk memecahkan persoalan dalam jala-jala, kita harus memperhatikan petunjuk berikut :

- a. Tentukan arah keliling (berputar) kita dalam memecahkan persoalan searah atau berlawanan arah dengan putaran jarum jam.
- b. Tentukan arah arus sementara, sekehendak kita; arah yang sebenarnya akan kita dapatkan di akhir perhitungan.
- c. Berilah tanda – dan + pada jepit-jepit sumber arus.
- d. Bila kita berjalan melalui sumber arus dari + ke – kenaikan tegangan : positif (kita beri tanda +), bila sebaliknya negatif (kita beri tanda -).
- e. Bila kita berjalan searah dengan arus, turun tegangan diberi tanda +, bil kita berlawanan dengan arah arus diberi tanda -.

Misalkan harga-harga dalam jala-jala di gambar 1-18 sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 4,5 \text{ ohm;} \\
 rd_1 &= 0,5 \text{ ohm;} \\
 E_1 &= 10 \text{ volt;} \\
 R_2 &= 9 \text{ ohm.} \\
 Rd_2 &= 1 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$



Gambar 1-18 jala-jala yang agak rumit

Maka dengan berputar searah dengan putaran jarum jam kita dapatkan :

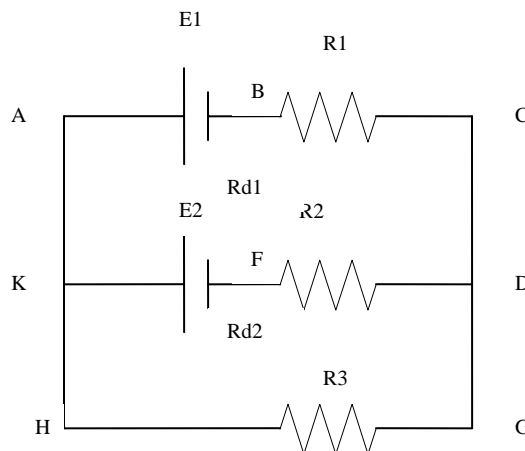
$$\begin{aligned}
 E_1 + E_2 &= I \times rd_1 + I \times R_1 + I \times rd_2 + I \times R_2 \\
 10 + 5 &= 0,5 I + 4,5 I + 1I + 9I \\
 15 &= 15 I \\
 I &= \frac{15}{15} = 1 \text{ amper.}
 \end{aligned}$$

Untuk lebih jelasnya lagi, kita lihat jala-jala dalam gambar 3-60. Di sini kita mempunyai 3 rangkaian tertutup :

- I. A – B – C – D – F – K – A,
- II. K – F – D – G – H – K, dan
- III. A – B – C – D – G – H – K – A.

Kita tentukan arah arus dan arah keliling kita seperti dalam gambar. Tanda + dan – kita berikan pada ujung-ujung sumber arus. Yang harus dicari kuat arus dalam masing-masing cabang. Harga-harga ggl dan tahanan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 17V; & rd_1 &= 1 \text{ ohm;} & R_1 &= 1 \text{ ohm;} & R_3 &= 5 \text{ ohm.} \\
 E_2 &= 20V; & rd_2 &= 0,5 \text{ ohm;} & R_2 &= 2 \text{ ohm;}
 \end{aligned}$$



Gambar 1-19

Kita gunakan hukum kirchhoff II dalam angkaian tertutup pertama (A – B – C – D – F – K - A), kita dapatkan :

$$\begin{aligned}
 +E_1 - E_2 &= I_1 \times r_{d1} + I_1 \times R_1 - I_2 - I_2 \times r_{d2} \\
 17 - 20 &= (I_1 \times 1) + (I_1 \times 1) + (I_1 - I_2) \times 0,5 + (I_1 - I_2) \times 2 \\
 -3 &= I_1 + I_1 + 0,5 I_1 - 0,5 I_2 + 2 I_1 - 2 I_2 \\
 -3 &= -0,5 I_1
 \end{aligned}$$

Dalam rangkaian tertutup ke-II (K – F – D – G – H - K) :

$$\begin{aligned}
 +E_2 &= I_2 \times r_{d2} + I_2 \times R_2 - I_3 \times R_3 \\
 20 &= 0,5 I_2 + 2 I_2 + 5 I_3 \\
 20 &= 2,5 I_2 + 5 I_3 \dots\dots\dots (II)
 \end{aligned}$$

Dalam rangkaian tertutup ke-III (A – B – C – D - G – H – K - A) :

$$\begin{aligned}
 +E_1 &= I_1 \times r_{d1} + I_1 \times R_1 + I_3 \times R_3 \\
 17 &= I_1 + I_1 + 5 I_3 \\
 17 &= 2 I_1 + 5 I_3 \dots\dots\dots (III)
 \end{aligned}$$

Menurut Kirchhoof I, di titik K : $I_3 = I_1 + I_2 \dots\dots\dots (IV).$

Kita masukan harga I_3 dari pers. IV ke dalam pers. II :

$$20 = 2,5 I_2 + 5 (I_1 + I_2) = 5 I_1 + 7,5 I_2$$

Kita kurangkan pers. II dari pers. I :

$$\begin{aligned}
 -3 &= 2 I_1 - 2,5 I_2, \text{ kita kalikan 5, dan} \\
 20 &= 5 I_1 + 7,5 I_2, \text{ kita kalikan 2, menjadi :} \\
 -15 &= 10 I_1 - 2,5 I_2 \\
 40 &= 10 I_1 + 15 I_2 - \quad \text{kita kalikan -1, menjadi :} \\
 -55 &= 0 - 27,5 I_2, \\
 +55 &= + 27,5 I_2 \quad I_2 = \frac{55}{27,5} = 2 \text{ amper.}
 \end{aligned}$$

Nilai I_2 kita masukan ke dalam pers. I :

$$\begin{aligned}
 -3 &= 2 I_1 - 2,5 I_2 = 2 I_1 - 2,5 \times 2 \\
 -3 &= 2 I_1 - 5 \quad -3 + 5 = 2 I_1 \\
 2 &= 2 I_1 \quad I_1 = 1 \text{ amper} \\
 I_3 &= I_1 + I_2 \quad I_3 = 1 + 2 = 3 \text{ amper.}
 \end{aligned}$$

Misalkan kini nilai-nilai ggl dan tahanan dalam jala-jala di gambar 1-19, seperti berikut :

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 9V; & r_{d1} &= 0,5 \text{ ohm}; & R_1 &= 1 \text{ ohm}; \\
 E_2 &= 3V; & r_{d2} &= 1 \text{ ohm}; & R_2 &= 2 \text{ ohm}; & R_3 &= 6 \text{ ohm.}
 \end{aligned}$$

Dalam putaran I, dengan searah putaran jarum jam, kita hasilkan :

$$\begin{aligned}
 E_1 &= I_1 \times r_{d1} + I_1 \times R_1 + I_3 \times R_3 \\
 9 &= 0,5 I_1 + I_1 + 6 I_3 \\
 9 &= 1,5 I_1 + 6 I_3 \quad (I)
 \end{aligned}$$

Dalam putaran II, dengan arah putaran berlawanan dengan putaran jarum jam :

$$\begin{aligned}
 E_2 &= I_2 \times r_{d2} + I_2 \times R_2 + I_3 \times R_3 \\
 3 &= I_2 + 2 I_2 + 6 I_3 = 3 I_2 + 6 I_3 \quad (II)
 \end{aligned}$$

15. Latihan Soal-soal

1. Segulung kawat tembaga yang panjangnya 1 km mempunyai penampang 4 mm^2 . Berapakah tahanan kawat itu? (4,375 ohm).
2. Sebuah penangkal petir dibuat dari batang tembaga dengan ukuran panjang 45 m, tebal 3 mm, dan lebar 20 mm. Berapakah panjang yang diperlukan?(0,013125 ohm).
3. Untuk membuat sebuah penahan (alat untuk menimbulkan tahanan dalam rangkaian listrik) kita memakai kawat nikelin dengan penampang $0,5 \text{ mm}^2$. tahanannya harus 2 ohm. Berapakah panjang yang diperlukan? (2,38 m).
4. Apakah beda tahanan dan daya-antar ?
5. Dua potong kawat tembaga, yang satu dua kali lebih panjang daripada yang lain, tetapi garis tengahnya hanya setengahnya. Kawat yang manakah yang lebih besar tahanannya ?
6. Sebuah kumparan kawat tembaga pada suhu 20°C dihubungkan kepada tegangan 220 volt, mengambil arus 4,4 ampere. Sesudah beberapa saat dialiri arus, menjadi panas. Arusnya turun menjadi 3,55 ampere. Berapakah suhunya kini ? (120°C).
7. Dua lampu dihubungkan deret pada tegangan 120 V. Arus yang mengalir dalam rangkaian deret ialah 1 A. Tahanan lampu pertama 75 ohm. Berapakah besar tahanan lampu ke dua ? (45 ohm)
8. Apakah akibatnya bila rugi-tegangan dalam pengantar terlalu besar?
9. Apakah akibatnya bila penampang kawat pengantar terlalu kecil untuk arus yang diizinkan?
10. Sekelompok lampu taman yang mengambil arus seluruhnya 44 A, diberi arus dari tempat sejauh 100m yang tegangannya 110 volt. Berapakah besar penampang kawat saluran tembaga yang memenuhi syarat? (70 mm^2).
11. Sebuah baterai akumulator dengan ggl 6 volt dan tahanan dalam 0,1 ohm, dengan perantaraan 2 kawat dihubungkan dengan sebuah penahan 5,5 ohm. Bila tahanan masing-masing kawat 0,2 ohm, tentukan:
 - a. Arus yang mengalir. (1 A).
 - b. Tegangan pada penahan. (5,5 V).
 - c. Tegangan pada jepit sumber arus. (5,9 V).
 - d. Kerugian tegangan pada kawat pengantar. (0,4 V).
 - e. Kerugian tegangan dalam sumber arus. (0,1 V).
 - f. Tegangan jepit bila penahan dihubungkan singkat. (0 V)
12. Tiga buah lampu masing-masing dengan ukuran 120 V/1 A, 120 V/1 A dan 220 V/3 A, dihubungkan jajar. Tegangan yang tersedia 120 volt. Lampu manakah yang paling terang dan yang paling suram nyalanya ? bila digantidengan sebuah lampu, harus berapa ukuran lampu yang digunakan? (120 V/4,7 A).
13. Sebuah rumah tinggal menggunakan lima buah lampu, masing-masing dengan ukuran : 120 V/0,5 A; 120 V/0,3 A; 120 V/1 A; 110 V/0,5 A dan 110 V/1 A. diwaktu sore hari tegangannya menurun hingga 100 volt. Berapakah :
 - a. Pemakaian arus pada tegangan 100 volt ? (2,85 A)
 - b. Pemakaian arus pada tegangan 110 volt ? (3,13 A)

- c. Bagaimana akibatnya bila tngangan meningkat menjadi 120 V ?
14. Untuk keperluan perayaan disediakan 60 buah lampu dengan ukuran 6V/0,5A. tegangan yang tersedia 120 volt. Bagaimana cara perhubungannya supaya semua lampu dapat dipakai dengan aman dan memenuhi syarat? Berpakah pemakaian arusnya ? (3 cabang jajar; 1,5 A)
 15. Ada 3 buah lampu listrik masing-masing : 2,5V/0,25A; 3,8V/0,4A dan 6V/0,5A. sumber tegangan yang tersedia 6 Volt. Bagaimana cara hubungannya supaya lampu dapat digunakan (gambarkan), dan berapa besar penahan muka yang dipakai? (lampu I dan II deret, lampu III jajar dengan rangkaian deret lampu I dan II; 4,5 ohm)
 16. Motor listrik 1 dk dihubungkan pada tegangan 220 volt. Berapakah arus yang diambil? Berapa besar usaha mekanik yang dapat dilakukan selama ½ jam? (3,345A; 135000 kgm).
 17. Kerugian daya yang diizinkan pada pengantar 10 watt. Arus yang mengalir 2 ampere. Tentukan tahanan kawat pengantarnya. (2,5 ohm).
 18. Sebuah toko memakai daya 10 kW pada tegangan 110 V. Bila tegangan dinaikkan sesuai dengan rencana pemerintah menjadi 220 volt, berapakah besar pemakaian arus kini? Berapakah sebelumnya? (45,5 A; 91A).
 19. Sebuah motor listrik dipakai untuk menggerakkan pompa air. Tinggi pemompaan 10 meter. Kecepatan memompa 5 L tiap sekon. Efisiensi pompa 60% dan efisiensi motor listrik 80%. Motor dihubungkan pada tegangan 110 V. Berapakah :
 - a. Pemakaian arus ? (9,3 A).
 - b. Daya motor listrik ? (1,02 kW).
 20. Sebuah pompa minyak digerakkan oleh motor listrik. Tiap 45 sekon dapat memindahkan 500 L minyak ke ketinggian 25 m. Berat jenis minyak 0,8. Efisiensi pompa 60% dan efisiensi motor listrik 80%.
 - a. Berapakah daya motor ?
 - b. Berapa kW daya listrik yang diperlukan ? (3,7 dk; 3,4 kW).
 21. Kita harus memberi arus sebuah alat listrik dari 600 watt/120v dengan baterai aki : 2,5 A. bagaimanakah cara menyusun baterai aki tersebut untuk keperluan alat listrik itu ? Berapakah :
 - a. Kuat arus yang dikeluarkan oleh tiap baterai aki ?
 - b. Besar kerugian daya dalam baterai ?
 22. Sebuah baterai terdiri dari 30 sumber arus. Tiap sumber arus mempunyai ggl 2V dan tahanan dalam 0,1 ohm. Jumlah cabang jajar ada 3. Tiap cabang mengeluarkan arus 0,5 A. Berapakah :
 - a. Tegangan jepit baterai ? (55,5 V).
 - b. Tahanan rangkaian luar ? (37 ohm).
 - c. Ggl baterai ? (60V).
 - d. Daya luar dan daya dalam baterai ? (83,25 W; 90 W).
 - e. Kerugian daya dalam baterai ? (6,75 W).

BAB II

DASAR KELISTRIKAN ARUS BOLAK BALIK

1. RANGKAIAN FASE-TUNGGAL

Persamaan untuk tegangan sesaat v_R yang melalui resistor pada waktu t adalah

$$v_R = V_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

Dimana V_m adalah tegangan maximum dan ω adalah frekuensi sudut dari catu daya dalam rad/det. Dengan menerapkan hukum Ohm ke dalam rangkaian, maka persamaan untuk arus sesaat i di dalam rangkaian adalah

$$i = \frac{v_R}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

Dimana I_m adalah arus maksimum dalam rangkaian. Karena bentuk gelombang tegangan maupun arus adalah sinusoidal, nilai RMS V_R dari tegangan pada R adalah

(c) diagram fasor

$$V_R = V_m / \sqrt{2}$$

Dan nilai RMS I adalah

$$I = I_m / \sqrt{2}$$

Dari persamaan (2.2) kita lihat bahwa

$$I_m = V_m / R$$

Sehingga

$$\sqrt{2}I = \sqrt{2}V_R / R$$

Maka

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

Berarti

$$Arus_{RMS} = \frac{tegangan_{RMS}}{R}$$

Karena bentuk gelombang tegangan dan arus adalah sefase maka fasor tegangan dan arus juga sefase. Untuk diingat, suatu fasor adalah sebuah garis berskala untuk menggambarkan nilai RMS dari suatu besaran yang berubah secara sinusoidal.

1.1 . Daya yang Digunakan di dalam Rangkaian AC dengan Resistor Murni

Selama pengaruh pemanasan diperhitungkan, maka nilai efektif dari arus dalam rangkaian arus bolak balik adalah nilai RMS-nya. Karena itu daya P yang digunakan oleh sebuah resistor adalah

$$P = V_R I \quad \text{watt} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana V_R adalah nilai RMS dari tegangan yang terjadi pada resistor. Selanjutnya, karena $V_R = IR$ (lihat pers. (1.3)), maka

$$P = (IR) \times I = I^2 R \quad \text{W} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Dan

$$P = V_R \times \frac{V_R}{R} = \frac{V_R^2}{R} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.6)$$

Contoh 1.1

Suatu tegangan $v = 424,3 \sin 628,3t$ volt diterapkan pada sebuah resistansi murni 6Ω . Hitung a) nilai RMS dari arus dalam rangkaian, b) frekuensi catu daya dalam Hz, dan c) daya yang digunakan oleh rangkaian.

Penyelesaian:

$$V_m = 424,3 \text{ V}, \quad \omega = 628,3t \text{ rad/det}, \quad R = 6\Omega.$$

- $V_R = 424,3/2 = 300 \text{ V}$
 $I = V/R = 300/6 = 50 \text{ A}$
- Karena $\omega = 2\pi f$, maka
 $f = \omega/2\pi = 628,3/2 = 100 \text{ Hz}$
- $P = I^2 R = 50^2 \times 6 = 15\,000 \text{ W}$

1.2 Energi yang Digunakan di dalam Rangkaian AC dengan Resistor Murni

Energi W yang digunakan oleh sebuah rangkaian adalah

$$W = \text{daya} \times \text{waktu} = I^2 R t = \frac{V_R^2}{R} t \quad \text{J atau W det.} \quad (2.7)$$

1.3 Rangkaian AC dengan Induktor Murni

Suatu rangkaian fase –tunggal yang terdiri dari sebuah inductor murni ditunjukkan oleh Gambar 1.2a dimana

i = nilai sesaat dari arus

v_L = nilai sesaat dari tegangan yang melalui L

Bentuk gelombang dari arus i dan tegangan v_L untuk sebuah catu tegangan sinusoidal ditunjukkan oleh Gambar 1.2b. Bentuk gelombang dari tegangan v_L diterangkan sebagai berikut. Persamaan untuk GGL induksi diri dalam inductor L diberikan oleh

$$v_L = L \times \text{laju perubahan arus yang melalui } L \quad (2.8)$$

Dimana v_L dalam volt, L dalam Henry, dan laju perubahan arus dalam ampere per detik. Untuk menggambarkan pembentukan gelombang v_L , kita perhatikan keadaan dalam rangkaian pada saat-saat A, B, C dan D.

Saat (Instant) A.

Arus adalah nol tapi laju perubahannya (misalnya kemiringan dari grafik Arus) berada pada nilai maksimumnya dan mempunyai kemiringan positif. Nilai v_L mencapai nilai positif maksimumnya pada titik ini.

Saat (Instant) B.

Arus mencapai nilai positif maksimum, tetapi laju perubahannya adalah nol (kemiringan nol). Karena itu nilai v_L adalah nol.

Saat (Instant) C.

Sekali lagi arus adalah nol, tetapi laju perubahannya adalah maksimum dan negatif. Karena itu nilai v_L pada titik ini adalah nol.

Saat (Instant) D.

Arus mempunyai nilai negatif maksimum, tetapi kemiringan dari grafik arus adalah nol. Karena itu sekali lagi nilai dari v_L adalah nol. Jika setiap titik dari grafik v_L digambarkan secara cermat, bentuk gelombang yang didapat adalah gelombang kosinus.

Berarti, v_L adalah sinusoidal dan mendahului bentuk gelombang arus sebesar 90° (atau $\pi/2$ radian). Ringkasan dari hubungan diatas adalah sebagai berikut.

Dalam suatu induktor murni, bentuk gelombang tegangan mendahului bentuk gelombang arus sebesar 90° atau, dengan kata lain, bentuk gelombang arus ketinggalan dibelakang bentuk gelombang tegangan sebesar 90° .

HUBUNGAN FASE SECARA KALKULUS

Persamaan untuk GGL induksi diri v_L di dalam sebuah induktor L adalah :

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

Dimana di/dt adalah laju perubahan dari arus i dalam induktor. Jika bentuk gelombang arus adalah sinusoidal, misalnya $i = I_m \sin \omega t$, maka

$$\begin{aligned} v_L &= \frac{d}{dt}(I_m \sin \omega t) = \omega I_m \cos \omega t \\ &= \omega I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa v_L mendahului i sebesar 90° (atau i ketinggalan di belakang v_L sebesar 90°).

1.4 Reaktansi Induktif

Meskipun induktor pada Gambar 1.2 tidak mempunyai resistansi, arus di dalam rangkaian dibatasi sampai suatu nilai tertentu (berarti, arus di dalam rangkaian bukannya tak terhingga). Faktor yang membatasi arus rangkaian dikenal sebagai reaktansi induktif X_L dari induktans. Suatu cara untuk menentukan nilainya diberikan dibawah ini.

Nilai rata-rata dari tegangan yang melalui induktansi didapat dari

Dari persamaan dasar untuk rangkaian arus bolak balik, nilai rata-rata dari tegangan selama setengah daur positif dari suatu bentuk gelombang bolak balik adalah

$$\frac{V_{Lm}}{\pi/2}$$

Dimana V_{Lm} adalah tegangan maksimum yang melauai induktor. Juga, selama seperempat daur pertama dari bentuk gelombang, laju rata-rata dari timbulnya arus dalam rangkaian adalah

Dimana I_m adalah nilai maksimum dari bentuk gelombang arus dan T adalah

$$\frac{I_m}{T/4}$$

waktu perioda dari suatu daur. Tetapi, waktu perioda dari satu daur adalah sama dengan $1/f$. dimana f adalah frekuensi catu daya dalam Hz. Dengan demikian laju rata-rata dari timbulnya arus dalam seperempat daur pertama adalah

$$\frac{I_m}{1/4f} = 4fI_m$$

Dengan menerapkan persamaan diatas ke persamaan (1.11) di dapat

$$\frac{V_{Lm}}{I_m} = L \times 4fI_m$$

Atau

$$\frac{V_{Lm}}{I_m} = 2\pi fL = \omega L \quad \Omega \quad (2.13)$$

Kini, reaktansi induktif dari suatu induktor L diberikan oleh

$$X_L = \frac{V_L}{I}$$

Dimana V_L adalah nilai RMS dari tegangan melalui induktor, dan I adalah arus yang melewatinya.

Tetapi, $V_L = V_{Lm} / \sqrt{2}$ dan $I = I_m / \sqrt{2}$, maka

$$\frac{V_L}{I} = \frac{V_{Lm} / \sqrt{2}}{I_m / \sqrt{2}} = \frac{V_{Lm}}{I_m}$$

Dengan memadukan persamaan-persamaan di atas diperoleh

atau
$$X_L = \frac{V_L}{I} = \frac{V_{Lm}}{I_m}$$

$$\text{Reaktansi induktif } X_L = 2\pi fL = \omega L \quad \Omega \quad (2.13)$$

Alasan bahwa induktansi mempunyai reaktansi induktif adalah karena, jika arus dalam rangkaian berubah nilainya (seperti yang terus menerus pada catu daya sinusoidal), suatu GGL balik (*back emf*) terjadi di dalam induktor. GGL balik ini melawan perubahan dalam arus dan karena itu membatasi besarnya arus.

Karena terjadi GGL induksi diri atau GGL balik adalah alasan untuk terjadinya reaktansi induktif.

REAKTANSI INDUKTIF MENGGUNAKAN KALKULUS

Dari persamaan (1.10)

$$v_L = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Karena itu, v_L adalah sinusoidal dan mempunyai nilai maksimum V_{Lm} sebesar

Maka
$$v_{Lm} = \omega L I_m$$

$$X_L = \frac{V_{Lm}}{I_m} = \frac{L I_m}{I_m} = \omega L = 2\pi fL$$

Contoh 1.3

Tentukan reaktansi induktif dari suatu gulungan inti-udara dengan induktansi 1 mH pada frekuensi a) 50 Hz, b) 50kHz, c) 50 MHz. hitung pula besar arus pada masing-masing frekuensi jika nilai RMS dari tegangan catu daya adalah 31,42 V RMS

Penyelesaian

$$L = 1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}, \quad V_s = 31,42 \text{ V}$$

a) $f = 50 \text{ Hz}$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 10^{-3} = 0,3142$$

$$I = V/X_L = 31,42/0,3142 = 100 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } f &= 50 \text{ kHz} = 50 \times 10^3 \text{ Hz} \\ X_L &= 2\pi fL = 2\pi \times (50 \times 10^3) \times 10^{-3} = 314,2 \\ I &= V/X_L = 31,42/314,2 = 0,1 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } f &= 50 \text{ MHz} = 50 \times 10^6 \text{ Hz} \\ X_L &= 2\pi fL = 2\pi \times (50 \times 10^3) \times 10^{-6} \times 10^{-3} \\ &= 314,2 \times 10^3 \\ I &= V/X_L = 31,42/314,2 \times 10^3 \\ &= 0,1 \times 10^{-3} \text{ A atau } 0,1 \text{ mA} \end{aligned}$$

1.6 Efek dari Frekuensi Catu Daya pada Reaktansi Induktif dan pada Arus Rangkaian

Persamaan (1.13) menunjukkan, untuk suatu nilai induktansi tertentu L , reaktansi induktif adalah sebanding dengan frekuensi catu daya. Berarti, reaktansi adalah nol pada frekuensi nol, dan nilainya naik secara linier ke tak terhingga pada frekuensi tak terhingga. Perhatikan contoh 1.3, hasilnya menunjukkan bahwa reaktansi induktif pada 50 MHz adalah sejuta kali lebih besar daripada reaktansi induktif pada 50 Hz. Gambar 1.3 adalah suatu grafik yang menunjukkan hubungan umum antara X_L dan frekuensi.

Arus yang mengalir melalui suatu induktor murni dengan reaktansi X_L adalah

$$I = \frac{V_s}{X_L} = \frac{V_s}{2\pi fL}$$

dimana V_s adalah tegangan catu daya dan f adalah frekuensi. Jika tegangan catu daya adalah tetap, maka

$$I = \frac{1}{f}$$

Berarti, suatu pertambahan pada frekuensi menyebabkan suatu pengurangan pada arus. Grafik yang menunjukkan hubungan ini ditunjukkan pada gambar 1.3; jawaban dari contoh 1.3 memastikan bentuk umum dari kurva I - f .

1.7 Rangkaian AC dengan Kapasitansi Murni

Suatu rangkaian fase-tunggal yang terdiri dari sebuah kapasitor ditunjukkan dalam dimana

I = nilai sesaat dari arus dalam rangkaian

v_c = nilai sesaat dari tegangan yang melalui kapasitor

Suatu diagram yang menunjukkan bentuk gelombang tegangan kapasitor dan arus untuk sebuah catu daya sinusoidal diberikan dalam gambar 1.5b. Untuk suatu tegangan catu daya sinusoidal, bentuk gelombang arusnya diterangkan sebagai berikut. Persamaan untuk arus yang melalui kapasitor adalah:

$$i = \text{kapasitansi} \times \text{laju perubahan tegangan kapasitor} \quad (1.14)$$

Untuk menggambarkan terjadinya bentuk gelombang arus, kita perhatikan bentuk dari gelombang tegangan dalam gambar 1.5b pada saat-saat A, B, C dan D.
saat (*Instant*) A.

pada saat ini v_c adalah nol, tetapi laju perubahannya mempunyai nilai positif maksimum. Karena itu i mempunyai nilai positif maksimum.

Saat (Instant) B

Disini, v_c mempunyai nilai positif maksimum, tetapi kemiringan dari grafik v_c adalah nol. Nilai i karenanya adalah nol pada saat ini.

Saat (Instant) C

v_c sekali lagi adalah nol, dan laju perubahannya adalah negatif maksimum. Karena itu i mempunyai nilai negatif maksimum pada saat ini.

Saat (Instant) D

v_c mempunyai nilai negatif maksimum, tetapi kemiringan dari grafik v_c adalah nol. Karenanya nilai i adalah nol.

Jika grafik arus/waktu digambarkan, bentuk yang didapat Grafiknya adalah sinusoidal dan mendahului v_c sebesar 90° (atau $A/2$ radian). Kaitannya dengan diagram fasor ditunjukkan pada Gambar 1.5c. Hubungan di atas dapat diringkas sebagai berikut.

Dalam suatu rangkaian arus bolak balik yang hanya terdiri dari sebuah kapasitor murni, bentuk gelombang arus mendahului bentuk gelombang tegangan sebesar 90° atau, dengan perkataan lain, bentuk gelombang tegangan ketinggalan di belakang bentuk gelombang arus sebesar 90° .

HUBUNGAN FASE SECARA KALKULUS

Persamaan untuk arus i dalam sebuah kapasitor adalah

$$i = C \frac{dv_c}{dt}$$

dimana dv_c/dt adalah laju perubahan tegangan yang melalui kapasitor. Jika tegangan kapasitor adalah sinusoidal, misalnya $v_c = V_{cm} \sin t$, dimana V_{cm} adalah nilai maksimum dari gelombang sinus dan ω adalah frekuensi sudut, maka

$$i = C \frac{d}{dt}(V_{cm} \sin \omega t) = \omega CV_{cm} \cos \omega t$$

$$= \omega CV_{cm} \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Berarti, i mendahului v_c sebesar 90° (atau v_c ketinggalan di belakang i sebesar 90°).

1.8 Reaktansi Kapasitif

Meskipun kapasitor dianggap oleh peneliti sebagai rangkaian terbuka (dikarenakan adanya sekat dielektrik diantara lempeng-lempengnya), suatu arus mengalir melaluinya jika ia dihubungkan ke sebuah catu daya arus bolak-balik.

Penyebab adanya aliran arus melalui sebuah kapasitor dalam suatu rangkaian arus bolak-balik adalah sebagai berikut. Jika tegangan diantara lempeng-lempeng sebuah kapasitor berubah, muatan yang disimpan oleh kapasitor juga berubah; atau, untuk merubah muatan yang tersimpan, suatu arus harus mengalir dalam rangkaian yang terhubung ke kapasitor. karena kapasitor dihubungkan ke suatu tegangan catu daya sinusoidal, tegangan yang melalui kapasitor berubah secara tetap dan teratur. Sebagai

akibat, kapasitor diberi muatan oleh catu daya, atau kapasitor mengosongkan muatan ke dalam sistem catu daya, dan menyebabkan timbulnya aliran arus seperti dibahas di atas.

Para insinyur memperhitungkan adanya aliran arus melalui sebuah kapasitor dalam suatu rangkaian arus bolak-balik dengan mengatakan bahwa kapasitor mempunyai reaktansi kapasitif X_c (yang dapat disamakan dengan reaktansi induktif pada sebuah induktor). Suatu cara sederhana untuk menentukan nilai reaktansi kapasitif diberikan di bawah ini. Nilai rata-rata dari arus yang mengalir melalui sebuah kapasitor adalah Dari kerja dasar suatu rangkaian AC, nilai rata-rata dari setengah daur positif dari suatu bentuk gelombang arus bolak-balik adalah

$$\frac{I_m}{\pi/2}$$

dimana I_m adalah nilai maksimum dari bentuk gelombang arus. Juga laju perubahan rata-rata dari tegangan selama seperempat daur yang pertama adalah

$$\frac{V_{cm}}{T/4}$$

dimana V_{cm} adalah nilai maksimum dari tegangan yang melalui C , dan T adalah waktu perioda dari bentuk gelombang. Tetapi, waktu perioda adalah juga sama dengan $1/f$, dimana f adalah frekuensi catu daya. Karena itu laju perubahan rata-rata dari tegangan selama seperempat daur yang pertama adalah

$$\frac{V_{cm}}{1/4f} = 4fV_m$$

Dengan menerapkan hubungan ini ke persamaan (2.17) diperoleh

$$\begin{aligned} \text{Atau } \frac{I_m}{\pi/2} &= C \times 4fV_{cm} \\ \frac{V_{cm}}{I_m} &= \frac{1}{2\pi fC} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Sekarang, reaktansi kapasitif dari sebuah kapasitor adalah

$$X_c = \frac{V_c}{I} = \frac{V_{cm}/\sqrt{2}}{I_m/\sqrt{2}} = \frac{V_{cm}}{I_m} \quad (2.19)$$

Dimana V_c dan I adalah nilai RMS dari tegangan dan arus kapasitor, dan V_{cm} dan I_m adalah nilai maksimumnya. Dengan memadukan persamaan (2.18) dan (2.19) diperoleh

$$\text{Reaksi kapasitif } X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega C} \quad (2.20)$$

Reaktansi kapasitif secara kalkulus. Dari persamaan (2.16)

$$I = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Dimana $I_m = \omega C V_{cm}$. Karena itu

$$X_c = \frac{V_{Cm}}{I_m} = \frac{V_{Cm}}{\omega C V_{Cm}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \Omega$$

Contoh 1.4

Tentukan reaktansi kapasitif dari sebuah kapasitor dengan kapasitansi 1,0 F pada frekuensi a) 50 Hz, b) 50 kHz, c) 50 MHz. Hitunglah arus kapasitor dalam setiap soal jika tegangan catu daya adalah 3,183 V RMS.

Penyelesaian:

$$C = 1 \mu\text{F} = 10^{-6}\text{f}, V_s = 3,183 \text{ V}$$

a) $f = 50 \text{ Hz}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 10^{-6})} = 3183 \Omega$$

$$I = V_s/X_C = 3,183/3183 = 0,001 \text{ A}$$

b) $f = 50 \text{ kHz} = 50 \times 10^3 \text{ Hz}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{[2\pi \times (50 \times 10^3) \times 10^{-6}]} = 3,183 \Omega$$

$$I = V_s/X_C = 3,183/3,183 = 1 \text{ A}$$

c) $f = 50 \text{ MHz} = 50 \times 10^6 \text{ Hz}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{[2\pi \times (50 \times 10^6) \times 10^{-6}]} = 3,183 \times 10^{-3} \Omega$$

$$I = V_s/X_C = 3,183/3,183 \times 10^{-3} = 1000 \text{ A}$$

Efek dari Frekuensi Catu Daya pada Reaktansi Kapasitif dan pada Arus Rangkaian

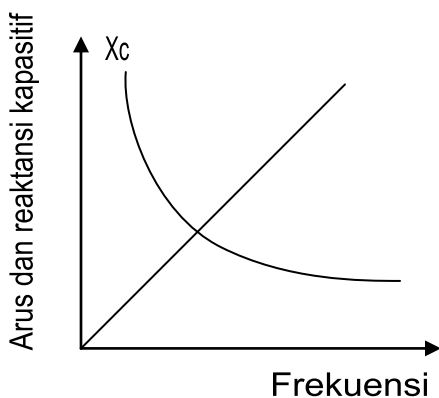
Persamaan (1.20) menunjukkan bahwa untuk suatu nilai kapasitansi tertentu

$$\text{Reaktansi kapasitif} \propto \frac{1}{\text{frekuensi}}$$

Berarti pada frekuensi nol (sama dengan operasi arus searah) reaktansi kapasitif adalah tak terhingga; karena frekuensi bertambah nilainya, reaktansi kapasitif berkurang, mencapai nol pada frekuensi tak terhingga. Hal ini dibenarkan oleh jawaban contoh soal 1.4. Nilai RMS dari arus I yang dialirkan oleh kapasitor C jika dihubungkan ke catu daya sinusoidal V_s volt RMS adalah

$$I = \frac{V_s}{V_C} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_s$$

Jika tegangan catu daya V_s adalah konstan maka Arus \propto frekuensi Jadi, arus adalah nol bila frekuensi nol (yaitu pada kondisi DC) dan meningkat secara linier menjadi tak hingga pada frekuensi tak hingga. Hubungan ini diperlihatkan dalam gambar 2-1 dan diperkuat dengan hasil contoh 1.4.



Gambar 2-1 Pengaruh frekuensi pada reaktansi kapsitif dan arus

1.11 Manfaat Mnemonic Rangkaian Arus Bolak Balik

Jika membicarakan hubungan fase antara tegangan dan arus dalam rangkaian-rangkaian kapasitif dan induktif, mnemonic CIVIL amatlah bermanfaat sebagai berikut: Dalam sebuah capacitor, I mendahului V

1.12 Hubungan Seri Resistansi dan Induktansi

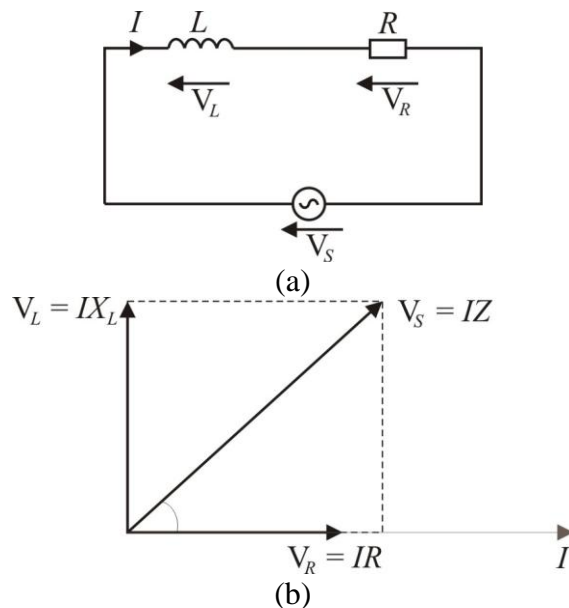
Gambar 1.7a menunjukkan rangkaian RL seri dihubungkan ke sebuah tegangan bolak balik V_s volt RMS pada frekuensi f Hz. Reaktansi dari induktor adalah $X_L = \omega L = 2 \pi f L \Omega$ Dan beda tegangan yang melalui induktor adalah:

$$V_L = I X_L = \omega L I = 2 \pi f L I \Omega$$

Dimana I adalah nilai RMS dari arus rangkaian. Nilai beda tegangan potensial yang melalui resistor adalah

$$V_R = I R \text{ Volt}$$

Diagram fasornya ditunjukkan dalam gambar 2-2b. Adalah hal yang biasa di dalam teknik listrik untuk menggambarkan fasor yang mewakili jumlah yang sama dengan mayoritas dari komponen dalam rangkaian pada arah acuan (horizontal) karena arus mengalir melalui tiap elelemen dalam suatu rangkaian seri, maka digambarkan pada arah acuan. Karena tegangan V_L yang melalui induktor mendahului arusnya sebesar 90° , fasor untuk V_L digambarkan pada arah ke atas. Tegangan V_R pada resistor adalah sefase dengan arus. Sehingga V_R digambarkan pada arah acuan. Karena V_L dan V_R saling tegak lurus, maka



Gambar 2-2 . R dan L seri dalam sebuah rangkaian bolak-balik

Tegangan catu daya = jumlah dari V_R dan V_L atau

$$V_s = \sqrt{(V_R^2 + V_L^2)} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{(I^2 R^2 + I^2 X_L^2)} = I \sqrt{(R^2 + X_L^2)} \\ &= IZ \end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{(R^2 + X_L^2)} = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)} \\
&= \sqrt{[R^2 + (2\pi fL)^2]}
\end{aligned}$$

Z adalah impedansi dari rangkaian RL dan merupakan perlawanan total dari rangkaian terhadap aliran arus. Suatu penelitian terhadap diagram fasor pada Gambar 1.7b menunjukkan bahwa, dalam rangkaian seri RL, arus ketinggalan di belakang tegangan catu daya (atau, dengan kata lain, tegangan catu daya mendahului arus). Sudut antara I dan V_s dikenal sebagai sudut fase θ dan dihitung sebagai berikut:

$$\cos \theta = \frac{V_R}{V_s} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{(R^2 + X_L^2)}}$$

Karena itu

$$\text{Sudut fase } \theta = \cos^{-1} \frac{R}{\sqrt{(R^2 + X_L^2)}} \quad (2.23)$$

Dimana \cos^{-1} berarti “sudut yang cosinusnya”. Selanjutnya

$$\sin \theta = \frac{V_L}{V_s} = \frac{IX_L}{IZ} = \frac{X_L}{Z}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{X_L}{Z} \right] \quad (2.24)$$

$$\text{Juga } \tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{IX_L}{IR} = \frac{X_L}{R}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{X_L}{R} \right] \quad (2.25)$$

Pada prakteknya, suatu gabungan mempunyai resistansi yang didistribusikan melalui kumparan, sehingga gulungan tidak hanya bersifat mempunyai induktansi tetapi juga resistansi. Dengan demikian, rangkaian lengkap pada gambar 2-2a lebih menggambarkan suatu gulungan daripada sebuah induktor dengan resistor terpisah.

Contoh 1.5

Suatu resistor murni 10 dihubungkan secara seri dengan sebuah induktor tak ber-resistansi dengan induktansi 0,1 H ke sebuah catu daya sinusoidal 100 V RMS pada frekuensi 60 Hz. Tentukan a) reaktansi dari induktor b) impedansi dari rangkaian, c) arus yang mengalir dalam rangkaian, d) tegangan yang melalui resistor dan melalui induktor, dan e) sudut fase dari rangkaian.

Penyelesaian:

$R = 10 \Omega$. $L = 0,1 \text{ H}$, $V_s = 100 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$

a) Reaktansi induktif adalah

$$X_L = 2 \pi fL = 2 \pi \times 60 \times 0,1 = 37,7 \Omega$$

- b) Impedansi rangkaian $Z = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} = \sqrt{(10^2 + 37,7^2)} = 39 \Omega$
 c) Arus $I = V/Z = 100/39 = 2,56 \text{ A}$
 d) Tegangan pada R = $V_R = IR = 2,56 \times 10 = 25,6 \text{ V}$
 Tegangan pada L = $I X_L = 2,56 \times 37,7 = 96,51 \text{ V}$

Catatan: Hasil yang diperoleh dapat diperiksa dengan menghitung nilai tegangan catu daya V_s dari nilai-nilai V_R dan V_L di atas sebagai berikut:

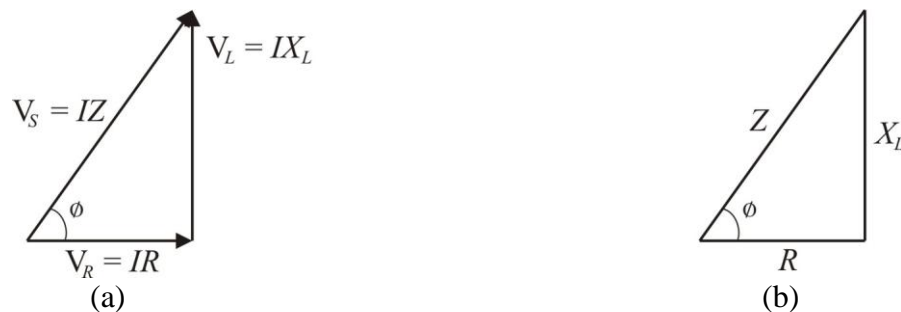
$$V_s = \sqrt{(V_R^2 + V_L^2)} = \sqrt{(25,6^2 + 96,51^2)} = 99,84 \text{ V}$$

Karena adanya ralat “pembulatan ke atas” dalam menghitung nilai dari V_R dan V_L , hasil nilai V_s berbeda 0,16 persen dari tegangan catu daya 100 V yang sebenarnya.

- e) Sudut fase $\theta = \tan^{-1}(V_L/V_R) = \tan^{-1}(96,51/25,6) = 75,14^\circ$
 (I ketinggalan di belakang V)

1.13 Segitiga Tegangan dan Segitiga Impedansi untuk Rangkaian RL Seri

Segitiga tegangan pada Gambar 2-3a untuk sebuah rangkaian RL seri didapat dengan mengutip fasor-fasor tegangan dari diagram fasor untuk rangkaian seri RL pada gambar 1.7b. diagram lain yang berguna, segitiga impedansi (lihat gambar 2-3b), didapat dengan membagi masing-masing sisi dari segitiga tegangan dengan arus rangkaian

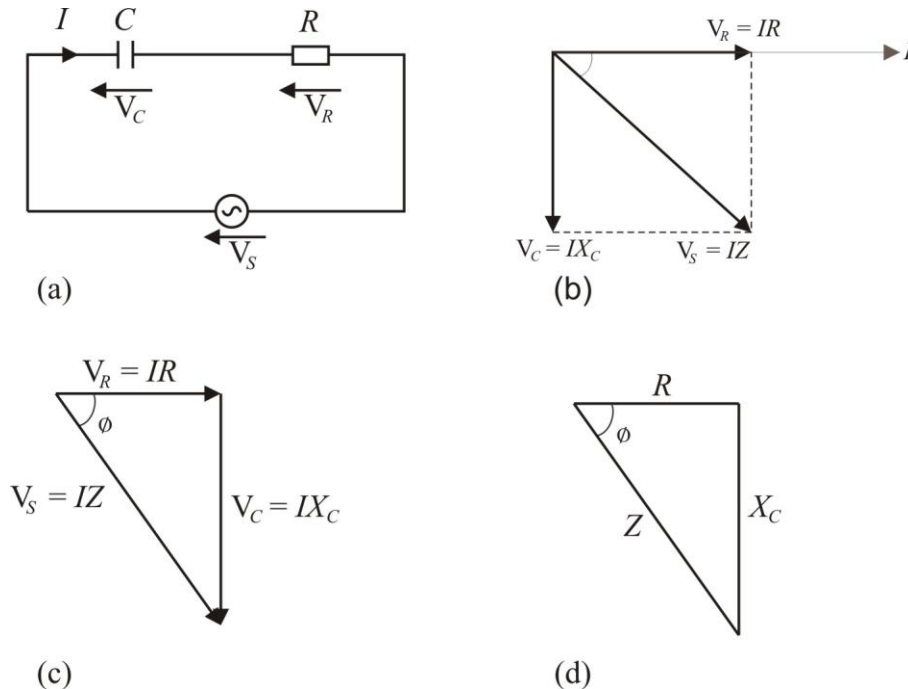


Gambar 2-3 (a) segitiga tegangan untuk sebuah rangkaian RL seri, (b) segitiga impedansinya.

Perhatikan bahwa sisi-sisi dari segitiga tegangan mempunyai anak panah untuk menunjukkan arah dari fasor-fasor tegangan (ingat, sebuah fasor menyatakan besaran yang berubah menurut waktu). Tetapi, sisi-sisi dari segitiga impedansi tidak mempunyai anak panah. Alasannya adalah karena resistansi, reaktansi dan impedansi tidaklah berubah menurut waktu dan tidak mempunyai “arah”. Segitiga tegangan dan segitiga impedansi merupakan konsep berguna dalam elektronika dan teknik listrik, dan dipakai secara luas mempelajari rangkaian-rangkaian listrik.

1.14 Resistansi dan Kapasitansi Secara Seri

Suatu rangkaian yang terdiri dari sebuah resistor dan sebuah kapasitor seri dengan sebuah catu daya arus bolak-balik, misalnya sebuah rangkaian RD seri, ditunjukkan dalam Gambar 2-4a, diagram fasornya ditunjukkan pada gambar 2-4b. karena arusnya sama untuk R dan C, diagram arusnya digambarkan pada arah acuan.



Gambar 2-4 (a) Rangkaian RC seri, (b) diagram fasornya, (c) segitiga tegangan, (d) segitiga impedansi.

Menerapkan hubungan fase yang telah dibicarakan sebelumnya, fasor yang menyatakan tegangan V_R yang melalui resistor digambarkan sefase dengan fasor arus I ; fasor yang menyatakan tegangan V_C yang melalui kapasitor ketinggalan di belakang arus sebesar 90° . Nilai-nilai numerik dari V_R dan V_C dihitung sebagai berikut

$$V_R = IR$$

$$\text{dan } V_C = IX_C = \frac{L}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

Karena fasor yang menyatakan V_R dan V_C saling tegak lurus, maka
Tegangan catu daya = jumlah fasor dari V_R dan V_C

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(V_R^2 + V_C^2)} \\ &= \sqrt{(I^2 R^2 + I^2 X_C^2)} \\ &= I\sqrt{(R^2 + X_C^2)} \end{aligned}$$

Karena itu

$$V_S = IZ \tag{2.26}$$

Dimana Z adalah impedansi dari rangkaian RC dan besarnya adalah

$$Z = \sqrt{(R^2 + X_C^2)} = \sqrt{\left(R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)} = \sqrt{\left\{R^2 + \frac{1}{(2\pi fC)^2}\right\}} \tag{2.27}$$

Perhatikan gambar 2-4b, dalam hal rangkaian RC seri yang diberi catu daya sinusoidal, arus mendahului tegangan catu daya sebesar sudut ϕ , yang merupakan sudut fase dari rangkaian. Nilainya dapat dihitung dari salah satu persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{V_R}{V_S} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z} \text{ atau } \theta = \cos^{-1}(R/Z) \\ \sin \theta &= \frac{V_C}{V_S} = \frac{IX_C}{IZ} = \frac{X_C}{Z} \text{ atau } \theta = \sin^{-1}(X_C/Z) \\ \tan \theta &= \frac{V_V}{V_R} = \frac{IX_C}{IR} = \frac{X_C}{R} \text{ atau } \theta = \tan^{-1}(X_C/R)\end{aligned}\quad (2.28)$$

Contoh 1.6

Suatu rangkaian seri terdiri dari sebuah resistansi 600 seri dengan sebuah kapasitor C. Jika rangkaian diberi tegangan sinusoidal sebesar 100 V RMS pada frekuensi 10 kHz, arus dalam rangkaian adalah 0,1 A. Tentukan a) impedansi dari rangkaian, b) reaktansi dari kapasitor dan kapasitansinya, c) tegangan yang melalui resistor dan kapasitor, d) sudut fase dari rangkaian.

Penyelesaian:

$$R = 600 \Omega, V_S = 100 \text{ V}, f = 10 \times 10^3 \text{ Hz}, I = 0,1 \text{ A.}$$

a) Impedansi rangkaian dihitung dari

$$Z = V_S/I = 100/0,1 = 1000 \Omega$$

b) karena $Z = \sqrt{(R^2 + X_C^2)}$, maka

$$X_C = \sqrt{(Z^2 - R^2)} = \sqrt{(1000^2 - 600^2)} = 800 \Omega$$

Sekarang $X_C = \frac{1}{2} \pi f X_C$, karena itu

$$\begin{aligned}C &= \frac{1}{2} \pi f X_C = 1/(2\pi \times 10 \times 1000 \times 800) \\ &= 0,02 \times 10^{-6} \text{ F atau } 0,02 \mu\text{F}\end{aligned}$$

c) Tegangan yang melalui R adalah $V_R = IR = 0,1 \times 600 = 60 \text{ V}$

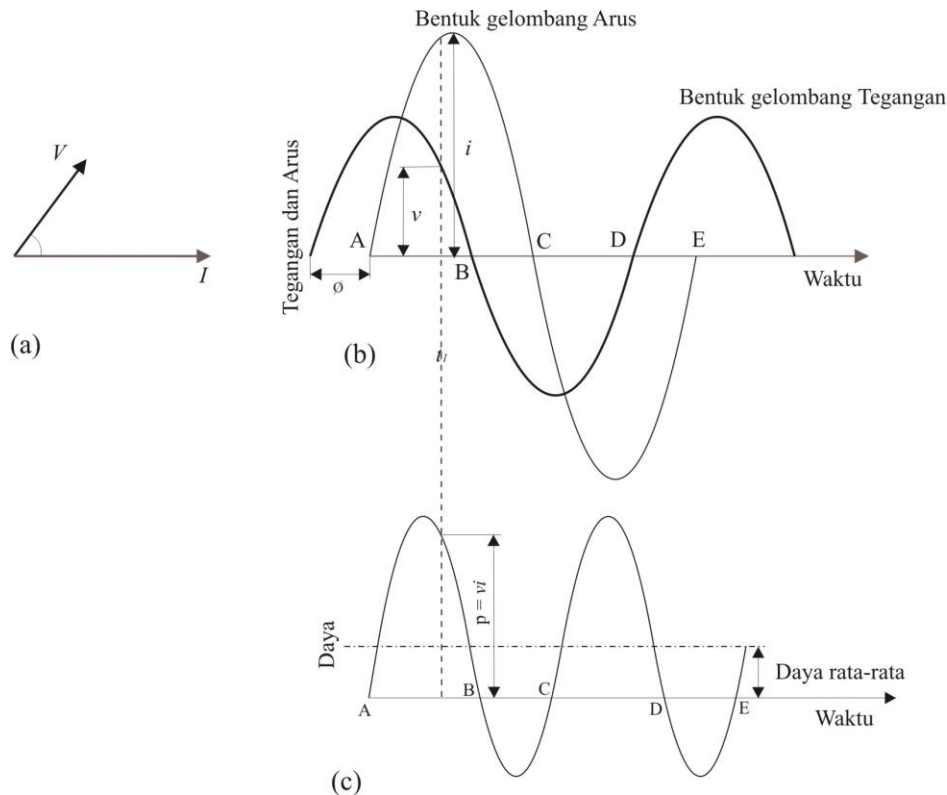
$$\text{Tegangan yang melalui C adalah } V_C = IX_C = 0,1 \times 800 = 80 \text{ V}$$

$$\text{Catatan: } V_S = \sqrt{(V_R^2 + V_C^2)} = \sqrt{(60^2 + 80^2)} = 100 \text{ V}$$

d) Sudut fase $\theta = \tan^{-1}(V_C/V_R) = \tan^{-1}(80/60) = \tan^{-1} 1,333$
 $= 53,13^\circ$ (I mendahului V_S)

1.15 Daya yang dikonsumsi oleh Rangkaian Seri yang Berisi Resistansi dan Reaktansi

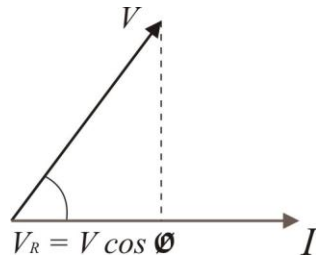
Sekarang perhatikan rangkaian seri dengan beberapa resistansi dan beberapa reaktansi induktif. Diagram fasor untuk rangkaian tersebut ditunjukkan pada gambar 1.10a (lihat pula Gambar 2.2b). bersama-sama dengan diagram bentuk gelombangnya pada gambar 1.10b. daya yang digunakan oleh rangkaian pada saat t_1 didapat dari perkalian antara arus sesaat i dan tegangan sesaat v . Jadi pada saat t_1 dalam Gambar 2-5, daya sesaat yang digunakan adalah $p = vi$ watt.



Gambar 2-5 (a) Diagram fasor untuk sebuah rangkaian RL seri, (b) diagram bentuk gelombangnya yang sesuai, (c) perubahan daya per daur

Pada saat A arus adalah nol, sehingga daya sesaat yang digunakan juga nol. Pada saat B tegangan adalah nol, dan daya sesaat yang digunakan juga nol. Menerapkan alasan ini ke hal-hal lain dari bentuk gelombang menunjukkan daya sesaat yang digunakan juga nol pada titik-titik C, D, dan E dalam Gambar 2-5. Di antara titik A dan B baik i maupun v bernilai positif, sehingga bentuk gelombang daya adalah positif di antara kedua titik ini; berarti, rangkaian mengkonsumsi daya di antara saat A dan B. Di antara titik-titik B dan C, i adalah positif dan v negatif, mengakibatkan bentuk gelombang daya mempunyai daerah negatif, berarti rangkaian memberikan daya kepada sumber daya. Menerapkan argumentasi ini ke bentuk gelombang menunjukkan bahwa bentuk gelombang daya adalah positif di antara C dan D (jika i dan v keduanya negatif), dan negatif di antara D dan E (jika v positif dan i negatif). Daya rata-rata yang digunakan oleh rangkaian selama satu daur frekuensi adalah sama dengan nilai rata-rata dari bentuk gelombang daya di antara A dan E. (lihat gambar 2-5c)

Untuk menghitung daya yang digunakan oleh sebuah rangkaian seri arus bolak-balik, patokan harus dibuat berdasarkan diagram fasor untuk rangkaian tersebut, yang digambarkan ulang pada Gambar 2-9. Daya rata-rata P yang digunakan oleh rangkaian adalah $\text{Daya } P = I \times VR = I \times V \cos \phi$ atau $\text{Daya } P = VI \cos \phi$ watt



Gambar 2-6 Penentuan daya yang digunakan oleh sebuah arus bolak-balik

Berarti daya yang dikonsumsi adalah sama dengan hasil perkalian volt-ampere dari komponen yang sefase, yaitu $VI \cos \phi$. Hasil yang sama juga didapat jika argumentasi serupa diterapkan ke sebuah rangkaian RC. Daya yang digunakan oleh tiap rangkaian adalah banyaknya volt-ampere yang digunakan untuk menghasilkan panas dan kerja yaitu volt-ampere “sefase”, dan sering dianggap sebagai daya riil (real power) ini membedakan dengan daya kwadratur dan daya nyata

Daya yang dikonsumsi oleh sebuah induktor murni Arus yang mengalir pada sebuah induktor murni ketinggalan di belakan tegangan yang melalui induktor sebesar 90° . Karena itu daya yang digunakan oleh induktor murni tanpa resistan adalah $P = VI \cos \phi = VI \cos 90^\circ = 0$

Daya yang dikonsumsi oleh sebuah kapasitor murni

Arus yang melalui sebuah kapasitor murni mendahului tegangan kapasitor sebesar 90° . Karena itu daya yang digunakan adalah

$$P = VI \cos \phi = VI \cos 90^\circ = 0$$

Perhitungan konsumsi daya dengan menggunakan kalkulus

Daya sesaat p yang digunakan oleh setiap rangkaian adalah sama dengan perkalian dari tegangan sesaat v dan arus sesaat i .

Sekarang

$$V = V_m \sin \theta$$

dan

$$I = I_m \sin (\theta \pm \phi)$$

Dimana V_m dan I_m adalah nilai maksimum dari bentuk gelombang tegangan dan arus, demikian pula, ϕ adalah sudut fase antara kedua bentuk gelombang. Daya sesaat p diberikan oleh

$$\begin{aligned} P &= vi = V_m I_m \sin \theta, \sin (\theta \pm \phi) \\ &= 1/2 V_m I_m (\cos \phi - \cos [2 \theta \pm \phi]) \\ &= 1/2 V_m I_m \cos \phi - 1/2 V_m I_m \cos [2 \theta \pm \phi] \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas kita melihat bahwa daya sesaat mempunyai dua komponen:

1. Daya rata-rata ($1/2 V_m I_m \cos \phi$)
2. Komponan bolak-balik ($1/2 V_m I_m \cos [2 \theta \pm \phi]$)

Jika yang ditentukan adalah daya yang dikonsumsi selama satu daur lengkap, nilai dari komponen bolak-balik adalah nol, karena itu daya rata-rata P yang digunakan oleh rangkaian selama tiap daur ulang adalah

$$P = 1/2 V_m I_m \cos \phi = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} \times \cos \phi = VI \cos \phi$$

Dimana V dan I adalah nilai RMS dari tegangan dan arus.

1.16 Daya Kuadratur atau Daya Reaktif

Daya kuadratur atau daya reaktif Q yang digunakan oleh rangkaian adalah (lihat pula Gambar 2-7)

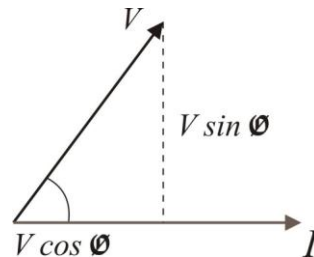
Daya kuadratur Q

= arus x kompona V yang tegak lurus terhadap I

= $I \times V \sin \emptyset$

= $VI \sin \emptyset$ volt-ampere reaktif (VAr) (2.29)

Istilah daya “kuadratur” diartika sebagai “tegak lurus terhadap” komponen daya utama ($VI \cos \emptyset$).



Gambar 2-7 penentuan daya reaktif yang digunakan oleh sebuah rangkaian arus bolak-balik

1.17 Daya Nyata atau Volt Ampere

Daya nyata yang digunakan oleh sebuah rangkaian adalah

Daya nyata S = tegangan x arus

= VI volt-ampere (VA) (2.30)

Dari persamaan di atas, besarnya volt-ampere yang digunakan oleh sebuah rangkaian adalah perkalian dari arus I yang mengalir dalam rangkaian dan tegangan V yang melalui rangkaian (perhitungan ini tanpa memperhatikan sudut kedua fase).

1.18 Segitiga Daya dan Faktor Daya

Jika tiap sisi dari segitiga daya sebuah rangkaian terdiri dari suatu resistansi dan suatu reaktansi dikalikan dengan besarnya arus, hasilnya adalah segitiga daya seperti pada gambar 2-8.

Segitiga daya ini menunjukkan bahwa

$P = VI \cos \emptyset = S \times \cos \emptyset$

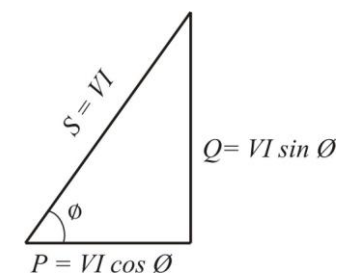
Berarti

Daya P = daya nyata (S) x faktor daya ($\cos \emptyset$)

Atau

Faktor daya = $\cos \emptyset$ (2.31)

Faktor daya mempunyai nilai 1,0 jika arus sefase dengan tegangan terpasang, ($\emptyset = 0^\circ$), dan bernilai nol jika $\emptyset = 90^\circ$ (yang timbul dalam rangkaian yang terdiri dari sebuah induktor murni atau kapasitor murni).



Gambar 2-8 segitiga daya

Karena faktor daya sebuah rangkaian adalah sama dengan $\cos \phi$, maka dari segitiga impedansi sebuah rangkaian seri (baik rangkaian RL maupun RC), faktor daya **Biaya berjalan** berhubungan dengan keluaran listrik dan termasuk biaya bahan bakar, air, gudang, perbaikan-perbaikan, biaya operasi dan rugi-rugi daya listrik yang terjadi di dalam pembangkitan dan pengiriman tenaga listrik.

$$\text{Faktor daya} = \cos \phi = \frac{R}{Z}$$

Cukup sering, para insinyur menganggap sebuah rangkaian mempunyai faktor daya “ketinggalan” atau faktor daya “mendahului” tanpa kualifikasi lain. Jika digunakan dalam hubungan ini, patokan dibuat berdasarkan sudut fase arus terhadap tegangan, misalnya fasor tegangan secara otomatis dianggap pada arah patokan. Berarti, faktor daya “ketinggalan” menyatakan bahwa arus ketinggalan di belakang tegangan dan faktor daya “mendahului” menyatakan bahwa arus mendahului tegangan.

Juga dari segi tiga daya, daya nyata (VA) dapat dihubungkan dengan daya (W) dan daya reaktif (VAr) sebagai berikut :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{VA}$$

Contoh 1.7

Sebuah rangkaian menghasilkan arus sebesar 10 A dari sebuah catu daya arus bolak-balik 100 V RMS. Hitung volt-ampere, daya dan Var yang digunakan jika sudut fase dari rangkaian adalah a) 0° , b) 60° , c) 90° .

Penyelesaian :

$$I = 10 \text{ A}, V_s = 100 \text{ V}$$

Untuk semua soal

$$\text{Daya nyata } S = V_s I = 100 \times 10 = 1000 \text{ VA}$$

a) $\phi = 0^\circ$

$$P = V_s I \cos \phi = 1000 \times \cos 0^\circ \\ = 1000 \times 1 = 1000 \text{ W}$$

$$Q = V_s I \sin \phi = 1000 \times \sin 0^\circ \\ = 1000 \times 0 = 0 \text{ VAr}$$

b) $\phi = 60^\circ$

$$P = V_s I \cos \phi = 1000 \times \cos 60^\circ \\ = 1000 \times 0,5 = 500 \text{ W}$$

$$Q = V_s I \sin \phi = 1000 \times \sin 60^\circ \\ = 1000 \times 0,866 = 866 \text{ VAr}$$

Catatan : $S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = \sqrt{(500^2 + 866^2)} = 1000 \text{ VA}$

c) $\emptyset = 90^\circ$

$$P = V_s I \cos \emptyset = 1000 \times \cos 90^\circ \\ = 1000 \times 0 = 0 \text{ A}$$

$$Q = V_s I \sin \emptyset = 1000 \times \sin 90^\circ \\ = 1000 \times 1 = 1000 \text{ Var}$$

Contoh 1.8

Suatu rangkaian seri terdiri dari sebuah resistor 800 dan sebuah kapasitor dengan reaktansi 600 Ω . Jika tegangan terpasang adalah 10 V RMS, hitung a) faktor daya dari rangkaian, b) arus yang dihasilkan oleh rangkaian, c) besarnya volt-ampere yang dikonsumsi, d) daya yang dikonsumsi, dan e) volt-ampere reaktif yang dikonsumsi.

Penyelesaian :

$$R = 800 \Omega, X_C = 600 \Omega, V_s = 10 \text{ V}$$

Dari angka-angka diatas

$$Z = \sqrt{(R^2 + X_c^2)} = \sqrt{(800^2 + 600^2)} = 1000 \Omega$$

a) Dari persamaan (1.31)

$$\text{Faktor daya} = R/Z = 800/1000 = 0,8$$

b) Arus $I = V/Z = 10/1000 = 0,01 \text{ A}$

c) Volt-ampere $S = V_s I = 10 \times 0,01 = 0,1 \text{ VA}$

d) Daya $P = V_s I \cos \emptyset = 0,1 \times 0,8 = 0,08 \text{ W}$

e) Volt-ampere reaktif

$$Q = V_s I \sin \emptyset \\ = 0,1 \sin \emptyset = 0,1 \sin (\cos^{-1} 0,8) \\ = 0,1 \times \sin 36,87^\circ = 0,1 \times 0,6 \\ = 0,06 \text{ VAr}$$

1.19 Rangkaian AC dengan Resistansi dan Induktansi Secara Paralel

Suatu rangkaian yang terdiri dari sebuah resistor murni R paralel dengan sebuah induktor murni L , yaitu **sebuah rangkaian RL paralel**, ditunjukkan pada gambar 2-9a. diagram fasornya (Gambar 2-9b) dibentuk sebagai berikut :

Karena tegangan catu daya V_s adalah sama untuk kedua cabang dari rangkaian, maka digambarkan pada arah acuan (mendatar).

Penyelesaian :

$$R = 3, L = 12,73 \times 10^{-3} \text{ H}, V_s = 3 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz.}$$

$$a) X_L = 2 \pi f L = 2 \pi \times 50 \times 12,73 \cdot 10^{-3} = 4 \Omega$$

$$b) I_R = V_s / R = 3/3 = 1 \text{ A (sefase dengan } V_s)$$

$$I_L = V_s / X_L = 3/4 = 0,75 \text{ A (ketinggalan di belakang } V_s \text{ sebesar } 90^\circ)$$

$$c) I = \sqrt{(I_R^2 + I_L^2)} = \sqrt{(1^2 + 0,75^2)} = 1,25 \text{ A}$$

d) Diagram fasornya pada umumnya sama dengan diagram pada gambar 2-8b dan

$$\phi = \cos^{-1}(I_R/I) = \cos^{-1}(1/1,25) = 36,87^\circ \text{ (} I \text{ ketinggalan dari } V_s \text{)}$$

e) Daya nyata $S = V_s I = 3 \times 1,25 = 3,75 \text{ VA}$

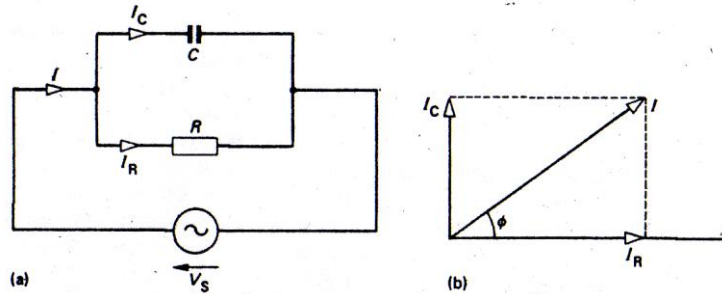
$$\begin{aligned} \text{Daya } P &= V_s I \cos \phi = 3,75 \times \cos 36,78^\circ \\ &= 3,75 \times 0,8 = 3,0 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VA reaktif, } Q &= V_s I \sin \phi = 3,75 \times \sin 36,78^\circ \\ &= 3,75 \times 0,06 = 2,25 \text{ VAR} \end{aligned}$$

f) Faktor daya = $\cos \phi = \cos 36,78^\circ = 0,8$ (I ketinggalan dari V_s)

1.20 Rangkaian AC dengan Resistansi dan Kapasitansi Secara Paralel

Diagram rangkaian untuk suatu rangkaian RC paralel ditunjukkan dalam gambar 2-9a dan diagram fasornya dalam gambar 2-9b. karena V_s berlaku untuk kedua cabang dari rangkaian, tegangan catu daya digunakan sebagai fasor patokan (acuan).



Gambar 2-9 (a) Rangkaian paralel terdiri dari R dan C , (b) diagram fasor

Arus I_R pada resistor sefase dengan tegangan catu daya, dan mengalir pada arah acuan. Juga, arus I_C dalam kapasitor melalui tegangan yang melalui kapasitor sebesar 90° , dan ditunjukkan pada diagram fasor dalam arah vertikal ke atas. Arus totala yang mengalir pada catu daya diberikan oleh

$$I = \text{jumlah fasor dari } I_R \text{ dan } I_C$$

Karena itu

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \tag{2.42}$$

Selanjutnya, karena R dan C mempunyai tegangan V_s padanya, maka

$$I_R = \frac{V_s}{R} \text{ dan sefase dengan } V_s \tag{2.43}$$

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{V_s}{X_C} = \frac{V_s}{1/\omega C} = \omega C V_s \\ &= 2\pi f C V_s \text{ dan mendahului } V_s \text{ sebesar } 90^\circ \end{aligned} \tag{2.44}$$

Sudut \emptyset adalah sudut fase dari rangkaian dan, seperti dapat dilihat dari diagram fasor pada Gambar 2-9b, arus mendahului tegangan satu daya sebesar \emptyset . Sudut fase dapat dihitung dari salah satu persamaan berikut :

$$\cos \emptyset = \frac{I_R}{I} \quad \sin \emptyset = \frac{I_C}{I} \quad \tan \emptyset = \frac{I_C}{I_R} \quad (2.45)$$

Seperti alasan yang sudah dikemukakan di muka, tidak ada daya dikonsumsi oleh kapasitor, sehingga daya yang dikonsumsi oleh rangkaian adalah

$$P = I_R^2 R \quad \text{W} \quad (2.46)$$

Atau, dengan perkataan lain, yang digunakan adalah

$$P = V_s I \cos \emptyset \quad \text{W} \quad (2.47)$$

Daya nyata (volt-ampere) yang digunakan oleh rangkaian adalah

$$S = V_s I \quad \text{VA} \quad (2.48)$$

Dan volt-ampere reaktif yang digunakan diberikan oleh

$$Q = V_s I \sin \emptyset \quad \text{Var}$$

Faktor daya rangkaian diberikan oleh

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya} &= \frac{\text{watt}}{\text{volt} - \text{amper}} = \frac{V_s I \cos \emptyset}{V_s I} \\ &= \cos \emptyset \end{aligned} \quad (2.50)$$

Contoh 1.10

Sebuah resistor 10 k Ω dihubungkan secara paralel dengan kapasitor 0,159 nF ke sebuah satu daya 1 V. 100 kHz. Hitung a) reaktansi dari kapasitor, b) arus yang mengalir dari tiap cabang rangkaian, c) arus total yang mengalir dari rangkaian, d) sudut fase dan factor daya dari rangkaian, dan e) volt-ampere, daya dan volt-ampere reaktif yang digunakan oleh rangkaian.

Penyelesaian :

$$R = 10 \times 10^3 \Omega, C = 0,159 \times 10^{-9} \text{ F}, V_s = 1 \text{ V.}$$

$$f = 100 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} \text{a) } X_C &= \frac{1}{2 \pi f C} = \frac{1}{(2 \pi \times 100 \times 10^3 \times 0,159 \times 10^{-9})} \\ &= 10\,000 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } I_R &= V_s / R = 1 / (10 \times 10^3) \\ &= 0,1 \times 10^{-3} \text{ A atau } 0,1 \text{ mA (sefase dengan } V_s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= V_s / X_C = 1 / 10\,000 \\ &= 0,1 \times 10^{-3} \text{ A atau } 0,1 \text{ mA (mendahului } V_s \text{ sebesar } 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\text{c) } I = \sqrt{(I_R^2 + I_C^2)} = \sqrt{(0,1^2 + 0,1^2)} \text{ mA} = 0,1414 \text{ mA}$$

d) Diagram fasornya pada umumnya sama dengan diagram pada Gambar 2-9, dan sudut fasenya dihitung sebagai berikut :

$$= \tan^{-1} (I_C / I_R) = \tan^{-1} (0,1 \text{ mA} / 0,1 \text{ mA}) = \tan^{-1} 1$$

Dan

$$\text{Factor daya} = \cos \emptyset = \cos 45^\circ = 0,707$$

$$\begin{aligned} \text{e) Volt-ampere } S &= V_s I = 1 \times 0,1414 \times 10^{-3} \\ &= 0,1414 \times 10^{-3} \text{ VA atau } 0,1414 \text{ mVA} \end{aligned}$$

$$\text{Daya } P = V_s I \cos \emptyset = 0,1414 \cos 45^\circ$$

$$= 0,1414 \times 0,707 \text{ mW}$$

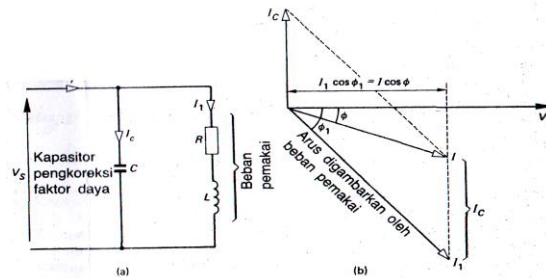
$$\text{VA reaktif, } Q = V_s I \sin \emptyset = 0,1414 \sin 45^\circ$$

$$= 0,1414 \times 0,707 \text{ mVAr} = 0,1 \text{ mVAr}$$

1.21 Koreksi Faktor Daya

Kebanyakan beban listrik dalam sistem daya adalah beban induktif di mana arus ketinggalan di belakang tegangan catu daya. Merupakan kebutuhan ekonomis bagi pihak pencatu daya untuk meminta pemakai supaya mempertahankan sejumlah faktor daya yang pantas, resiko yang harus dibayar pemakai jika hal ini tidak dipenuhi adalah tagihan listrik yang lebih tinggi. Karena itu biasanya pemakai mempertahankan beban pada suatu faktor daya yang pantas.

Beban pemakai dapat dianggap sebagai suatu resisitor seri dengan sebuah induktor, seperti ditunjukkan pada Gambar 2-10a. resistor R merupakan elemen pemakai daya dari beban.



Gambar 2-10a Koreksi faktor daya oleh kapasitor: (a) diagram rangkaian (b) diagram fasor

(yang dapat, misalnya, mewakili kerja dari sebuah motor), dan induktor L mewakili elemen induktif dari beban (mewakili, misalnya, gulungan dari sebuah motor). Karena tak adanya kapasitor C , arus beban I_1 mempunyai sudut fase ϕ_1 (lihat gambar 2-10b) dan factor daya $\cos \phi_1$.

Jika kapasitor koreksi factor daya dihubungkan secara paralel dengan beban induktif, kapasitor mengalirkan arus-mendahului I_C dari catu daya (lihat diagram fasor pada gambar 2-10b). akibatnya arus I yang mengalir dari catu daya adalah

$$I = \text{jumlah fasor dari } I_1 \text{ dan } I_C$$

Hasilnya dapat dilihat dalam diagram fasor. Perhatikan bahwa sudut fase dari arus I yang mengalir dari catu daya *setelah* kapasitor koreksi factor daya dihubungkan adalah ϕ , yang lebih kecil dari sudut-ketinggalan ϕ_1 menjadi $\cos \phi$.

Dengan analisa matematik dapat ditunjukkan bahwa, untuk setiap beban yang diberikan, terdapat batasan ekonomis terhadap besarnya koreksi faktor daya. Di luar batasan ini "law of diminishing returns" berlaku, dan biaya pemasangan serta emakaian kapasitor yang lebih besar adalah lebih tinggi dari pada hanya yang dapat dihemat dengan perbaikan faktor daya yang diperoleh.

Rating dari kapasitor yang digunakan untuk keperluan ini ditentukan oleh besarnya volt-ampere reaktif (VAr) atau kilo volt-ampere reaktif (kVAr) yang digunakan oleh kapasitor sebagai berikut :

$$\text{Rating kapasitor dalam kVAr} = \frac{V_s I_C}{1000}$$

Contoh 1.11

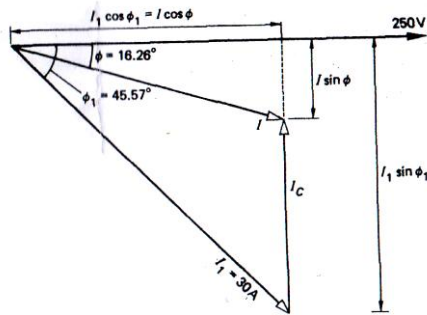
Suatu beban induktif mengalirkan arus sebesar 30 A pada factor daya ketinggalan sebesar 0,7 ketinggalan dari catu daya 250 V, 50 Hz. Untuk memperbaiki factor daya ari beban, sebuah kapasitor dihubungkan secara parallel dengan beban yang ada. Hitung a) arus yang mengalir dari rangkaian jika factor daya diperbaiki menjadi 0,96 ketinggalan. Tentukan pula untuk kapasitor b) arus yang dialirkan, c) reaktansi kapasitif, d) kapasitansinya, dan e) rating kVAr-nya.

Penyelesaian :

$I_1 = 30 \text{ A}$, $\phi_1 \cos^{-1} 0,7 = 45,57^\circ$ ketinggalan $V_s = 250 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\phi = \cos^{-1} 0,96 = 16,26^\circ$ ketinggalan.

a) komponen sefase (horizontal) dari arus beban induktif (lihat gambar 2.11) adalah

$$I_1 \cos \phi_1 = 30 \times \cos 45,57^\circ = 21 \text{ A}$$



Sekarang $I_1 \cos \phi_1 = I \cos \phi$ karena itu

$$I = \frac{I_1 \cos \phi_1}{\cos \phi} = \frac{21}{0,96} = 21,88 \text{ A}$$

b) Komponen tegak lurus dari arus induktif I_1 adalah

$$I_1 \sin \phi_1 = 30 \times \sin 45,57^\circ = 21,42 \text{ A}$$

Komponen tegak lurus dari arus I adalah

$$I \sin \phi = 21,88 \sin 16,26^\circ = 6,13 \text{ A}$$

Karena itu arus kapasitor diberikan oleh

$$I_C = I_1 \sin \phi_1 - I \sin \phi = 21,42 - 6,13 = 15,29 \text{ A}$$

c) $X_C = V_s / I_C = 250 / 15,29 = 16,35 \Omega$

d) Karena $X_C = \frac{1}{2} \pi f C$, maka

$$C = \frac{1}{2} \pi f X_C = \frac{1}{2} (2 \pi \times 50 \times 16,35) \\ = 194,7 \times 10^{-6} \text{ F atau } 194,7 \text{ nF}$$

e) Rating kVAr dari kapasitor adalah

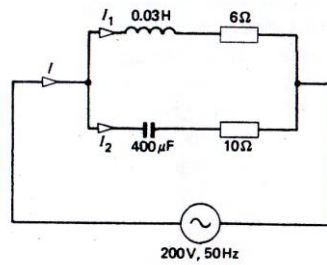
$$V_s I_C / 1000 = 250 \times 15,29 / 1000 = 3,82 \text{ kVAr}$$

1.22 Rangkaian AC Paralel Kompleks

Suatu rangkaian arus bolak balik kompleks dipecah menjadi bagian-bagian seri dan paralelnya, setiap bagian diperlakukan sebagaimana mestinya.

Contoh 1.12

Untuk rangkaian pada Gambar 1.18 tentukan a) impedansi dari masing-masing cabang, b) arus dalam tiap cabang dan sudut fasenya, c) daya yang digunakan oleh masing-masing cabang dan daya total yang digunakan, d) arus total I yang dialirkan oleh rangkaian dan sudut fasenya.



Gambar 2-12

Penyelesaian :

a) untuk cabang induktif (atas)

$$X_L = 2 \pi f L = 2 \pi \times 50 \times 0,03 = 9,42 \Omega$$

Impedansi Z_1 dari cabang induktif adalah

$$Z_1 = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} = \sqrt{(6^2 + 9,42^2)} = 11,17 \Omega$$

Untuk cabang kapasitif (bawah)

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} = \frac{1}{(2 \pi \times 50 \times 400 \times 10^{-6})} = 7,96 \Omega$$

Impedansi Z_2 dari cabang kapasitif adalah

$$Z_2 = \sqrt{(R^2 + X_C^2)} = \sqrt{(10^2 + 7,96^2)} = 12,78 \Omega$$

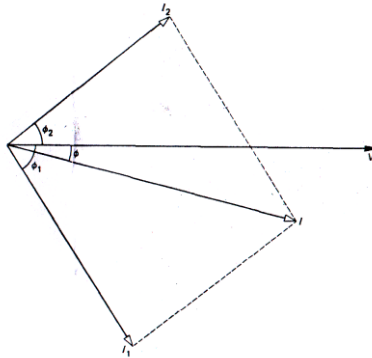
b) $I_1 = V_s / Z_1 = 200 / 11,17 = 17,91 \text{ A}$

$$I_2 = V_s / Z_2 = 200 / 12,78 = 15,65 \text{ A}$$

Sudut fase dari cabang induktif adalah

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \cos^{-1} R_1 / Z_1 = \cos^{-1} (6 / 11,17) \\ &= 57,51^\circ \text{ (} I_2 \text{ ketinggalan dari } V_s \text{)} \end{aligned}$$

Diagram fasornya diberikan dalam gambar 2-13



Gambar 2-13

2. SISTEM TIGA-FASE

2.1 Catu Daya Tiga-fase

Sistem satu daya tiga-fase (*three-phase supply systems*) dikembangkan karena memberikan keuntungan teknis dan keuntungan finansial lebih daripada sistem fase-tunggal.

1. Daya dapat disalurkan secara ekonomis; ini karena dibutuhkan lebih sedikit tembaga untuk menyalurkan sejumlah daya ke dalam sebuah kabel untuk sebuah satu daya tiga-fase daripada yang dibutuhkan tiga kabel fase-tunggal yang terpisah.
2. Motor induksi tiga-fase amat kuat dan dirancang sederhana. (Motor fase-tunggal relatif rumit dan melibatkan mekanisme elektro-mekanikal untuk awal menjalankannya.)
3. Untuk suatu daya keluaran mekanikal tertentu, ukuran fisik dari mesin tiga-fase lebih kecil daripada mesin fase-tunggal yang ekuivalen.

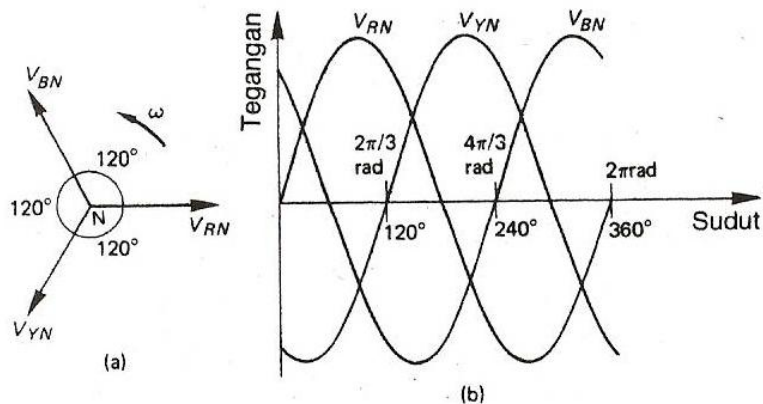
Suatu sistem catu daya tiga-fase yang seimbang (*balanced three phase supply system*) menyediakan tiga set tegangan yang sama dimana masing-masing berbeda fase sebesar 120° (atau $2/3$ radian) (lihat Gambar 2-14). Tegangan dibangkitkan dalam tiga kumparan (fase) generator yang terpisah. dimana fase-fase ini dikenal sebagai fase merah (R). fase kuning (Y). dan fase biru (B).

Masing-masing tegangan dapat diwakili oleh sebuah fasor. yang diskala sesuai tegangan RMS dari tegangan dan ditampilkan dalam Gambar 2-14a pada saat dimana = 0° . Notasi yang digunakan untuk menerangkan tegangan tersebut adalah sebagai berikut.

V_{RN} = tegangan pada saluran- R terhadap titik netral.

V_{YN} = tegangan pada saluran- Y terhadap titik netral.

V_{UN} = tegangan pada saluran- B terhadap titik netral.



Gambar 3.1 (a) Diagram fasor dari suatu tegangan seimbang 3- fase bentuk gelombang

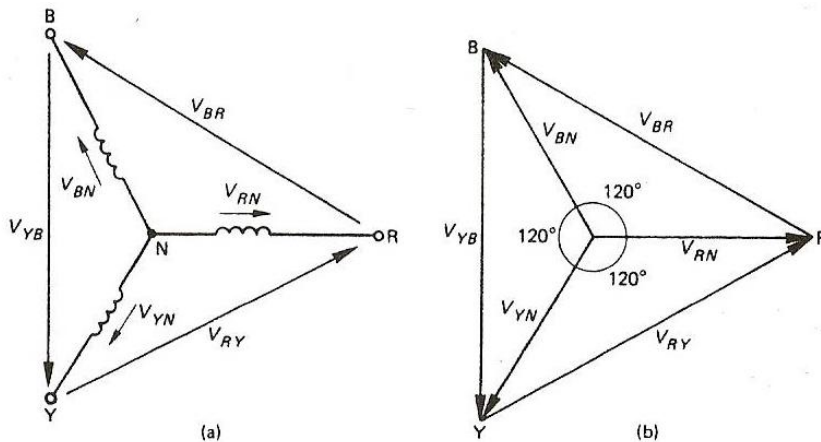
Gambar 2-14. (a) Diagram fasor dari suatu tegangan seimbang 3 fase, bentuk gelombang

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-14a. V_{YN} ketinggalan di belakang V_{RN} sebesar 120° . dan V_{BN} ketinggalan di belakang V_{YN} sebesar 120° . berikutnya (atau.dengan perkataan lain. V_{BN} mendahului V_{RN} sebesar 120°). Urutan fase (*phase sequence*) dari fasor-fasor tersebut adalah urutan dimana fasor-fasor tegangan bergerak melalui nol (perputaran dianggap searah jarum jam). dan urutan fase yang normal atau urutan fase positif (*positive phase sequence*) adalah merah, kuning. biru (R. Y, B).

2.2 Hubungan Bintang pada Tegangan Tiga-Fase

Dalam suatu generator **hubungan-bintang** (*star-connected*), satu ujung dari masing-masing kumparan dihubungkan ke sebuah terminal gabungan yang dikenal sebagai titik bintang (*star point*). Titik ini seringkali dihubungkan dengan bumi dan netral secara listrik, sehingga disebut juga **titik netral** (*neutral point*) N (lihat Gambar 2.15a). Setiap kumparan dari generator dikenal sebagai sebuah **kumparan fase** (*phase winding*), dan tegangan yang terjadi di dalam kumparan dikenal sebagai **tegangan fase** (*phase voltage*). Maka tegangan fase adalah V_{RN} , V_{YN} dan V_{BN} dalam fase R, Y, B. **Tegangan saluran-ke-saluran** (atau tegangan saluran) *line-to-line voltage (or line voltage)* adalah tegangan di antara sepasang saluran. Ketiga tegangan saluran dihitung dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned} V_{BR} &= \text{tegangan saluran- B terhadap saluran-R} \\ &= V_{BN} - V_{RN} \\ V_{YB} &= \text{tegangan saluran- Y terhadap saluran-Y} \\ &= V_{YN} - V_{BN} \\ V_{RY} &= \text{tegangan saluran- Y terhadap saluran-R} \\ &= V_{YN} - V_{YR} \end{aligned}$$



Gambar 2-15 (a) hubungan bintang dari kumparan 3-fase, (b) diagram fasornya
 Dalam suatu sistem hubungan-bintang yang seimbang yang mempunyai tiga nilai tegangan fase V_p yang sama, dapat ditunjukkan bahwa besar tegangan saluran V_L adalah

$$V_L = \sqrt{3}V_p \dots \dots \dots (2-51)$$

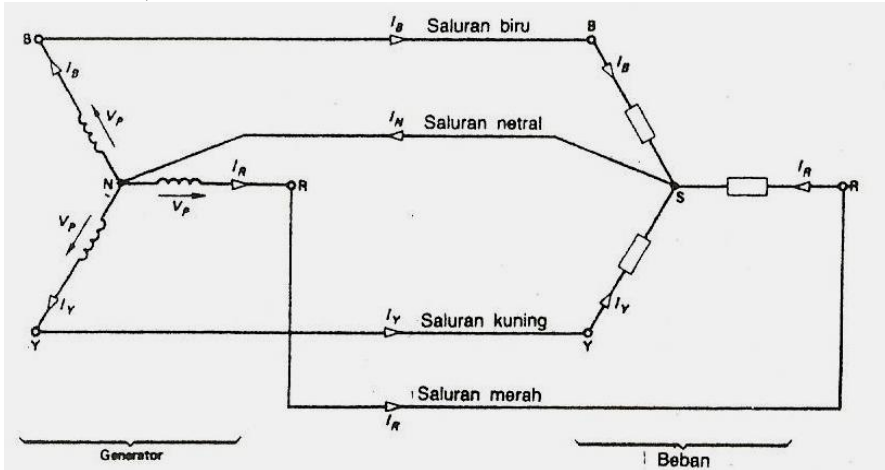
Suatu alternator 3-fase hubungan-bintang yang membangkitkan 1905 Volt per fase memberikan tegangan saluran sebesar

$$V_L = \sqrt{3}V_p = \sqrt{3} \times 1905 = 3300 \text{ V}$$

2.3 Sistem Tiga-fase Empat-kawat

Suatu metoda terkenal untuk mendistribusikan listrik, misalnya, ke seluruh kompleks perumahan adalah sistem **tiga-fase empat kawat** (*three-phase four-wire system*) dilukiskan dalam Gambar 3.3. Arus dialirkan ke beban sepanjang saluran R, Y dan B, dan jumlah fasor dari ketiga arus dikembalikan dari titik bintang ke titik netral N

dari generator. (Penggunaan istilah titik "bintang" dan titik "netral" adalah sama dalam konteks ini).



Gambar 2-16 Sebuah sistem' hubungan bintang 3-fase 4-kawat

Pada umumnya, beban listrik pada suatu perumahan adalah **beban tak seimbang** (*unbalanced load*). Artinya, arus yang mengalir dari masing-masing fase beban berbeda baik besarnya . maupun sudut fasenya dari kedua fase yang lain. Untuk mendapatkan nilai tegangan yang sama pada masing-masing fase beban, diperlukan pemakaian satu daya 3-fase 4-kawat dimana titik netral dari satu daya dihubungkan langsung ke titik bintang dari beban. Ingat bahwa pada Gambar 3.3 arus yang mengalir dalam kumparan fase generator juga mengalir dalam kawat. Artinya, arus I_R pada fase-R dari generator juga mengalir pada saluran-R dari kabel. Berarti dalam sistem hubungan-bintang
Arus fase = arus saluran

$$I_p = I_L \quad (2-52)$$

Dengan menerapkan hukum Kirchhoff yang pertama ke titik netral dari generator ataupun ke titik bintang dari beban dapat ditunjukkan bahwa

$$I_N = \text{jumlah fasor dari } I_R, I_Y \text{ dan } I_B$$

Contoh 3.1

Arus garis dalam sebuah sistem tiga-fase empat-kawat adalah sebagai berikut:

$$I_R = 20 \text{ A sefase dengan } V_{RN}$$

$$I_Y = 30 \text{ A sefase dengan } V_{YN}$$

$$I_B = 32 \text{ A sefase dengan } V_{BN}$$

Tentukan besarnya ~HUS netral I_N dan juga sudut fasenya terhadap V_{RN} .

Penyelesaian :

Penyelesaian dapat ditentukan baik secara grafik maupun secara matematik. dan kedua cara tersebut digunakan disini.

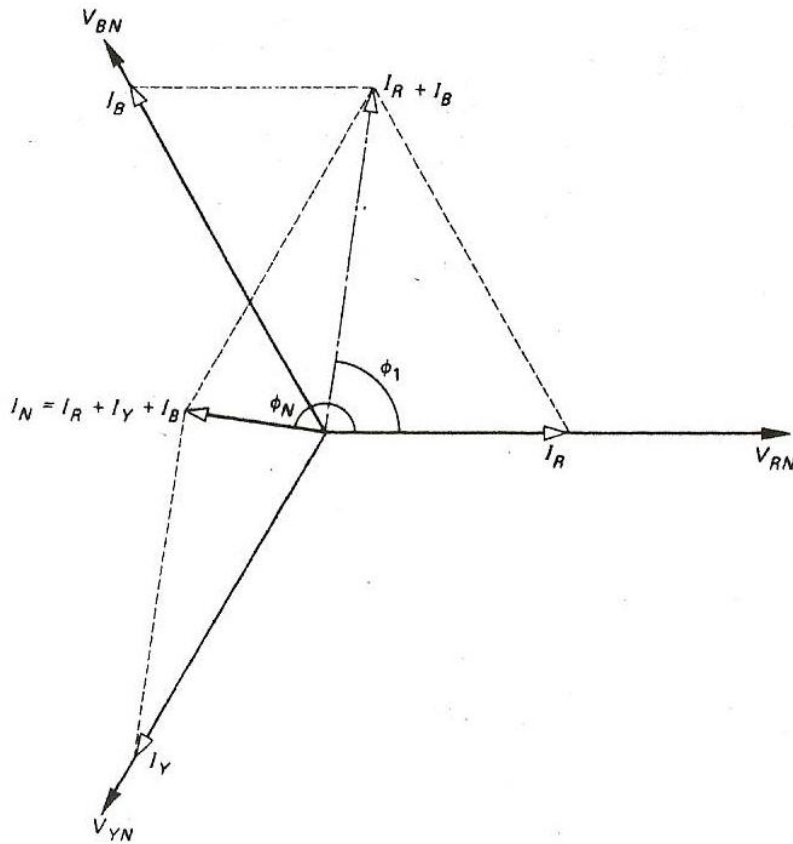
Penyelesaian grafik Diagram fasor mula-mula digambar menurut skala (lihat Gambar 3.4). Kemudian. setiap dua fasor arus saling dijumlahkan; pada Gambar 2-17 fasor I_R dan I_B dijumlahkan untuk mendapatkan fasor $(I_R + I_B)$

yang mendahului V_{RN} sebesar sudut ϕ_1 .

Fasor I_Y kemudian ditambahkan'ke $(I_R + I_B)$ untuk mendapatkan fase arus netral I_N

Perkiraan penyelesaian dari diagram adalah:

$$I_N = 11.0 \text{ A mendahului } V_{RN} \text{ sebesar } \phi_N = 171.5^\circ$$



gambar 2-17

Nilai ϕ_N dapat pula dikatakan sebagai mendahului V_{BN} sebesar 51.1° , atau ketinggalan di belakang V_{YN} sebesar 68.5° .

Penyelesaian matematik:

Komponen horizontal dan vertikal dari masing-masing ketiga arus garis ditentukan sebagai berikut. :

Untuk I_R

$$\text{Komponen horizontal} = I_R \cos 0^\circ = \cos 0^\circ = 20\text{A}$$

$$\text{Komponen' vertikal} = I_R \sin 0^\circ = \sin 0^\circ = 0 \text{ A}$$

Untuk I_Y

$$\begin{aligned} \text{Komponen horizontal} &= I_Y \cos (-120^\circ) \\ &= 30 * (0,5) = - 15,0 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Komponen vertikal} &= I_Y \sin (-120^\circ) \\ &= 30 * (-0,866) = - 26,0 \text{ A} \end{aligned}$$

Untuk I_B

$$\begin{aligned} \text{Komponen horizontal} &= I_B \cos 120^\circ \\ &= 32 * (-0,5) = - 16,0 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Komponen vertikal} &= I_B \sin 120^\circ \\ &= 32 * 0,866 = 27,72 \text{ A} \end{aligned}$$

Komponen horizontal dan vertikal dari I_N dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Komponen horizontal dari } I_N &= \text{Jumlah komponen horizontal dari } I_R, I_Y \text{ dan } I_B \\ &= 20 + (-15,0) + (-16,0) = -11,0 \text{ A} \end{aligned}$$

Komponen vertikal dari $I_N =$ Jumlah komponen vertikal dari I_R, I_Y dan I_B
 $= 0 + (-26,0) + 27.72 = 1.72 \text{ A}$

Karena itu Besarnya I_N

$$= \sqrt{[(\text{komponen horizontal})^2 + (\text{komponenii vertikal})^2]}$$

$$= \sqrt{[(-11,0)^2 + 1,72^2]} = 11,14 \text{ A}$$

Dalam hal ini *perlu diperhatikan jika menggunakan kalkulator elektronik* untuk menentukan ϕ_N daTi nilai $\tan \phi_N$ di atas, karena *terdapat jebakan bagi yang tidak berhati-hati*, Kalkulator mungkin akan menghasilkan **sudut prinsip** (*principle angle*) dalam jangkauan $\pm 90^\circ$ untuk memenuhi nilai di atas, yaitu $-8,89^\circ$. Tetapi, tanda matematik relatif dari komponen vertikal dan horizontal dari $\tan \phi_N$ menunjukkan bahwa sudut ϕ_N terletak pada kwadran kedua. sehingga

$$\phi_N = 180^\circ + (-8.89^\circ) = 171.11^\circ$$

Beban Hubungan-bintang Tiga-fase Tiga-kawat

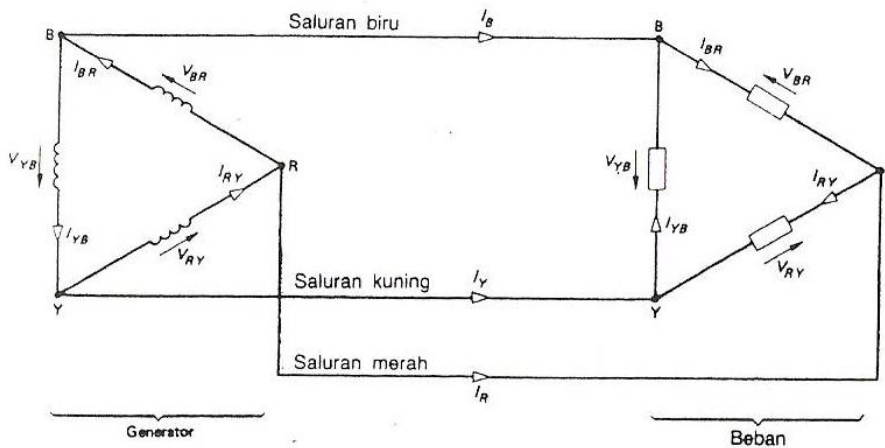
Jika beban tiga-fase dalam Gambar 2-15 adalah seimbang. dapat ditunjukkan bahwa jumlah fasor dari I_R, I_Y dan I_B adalah nol Artinya

$$I_N = 0$$

Maka selanjutnya jika suatu beban seimbang dihubungkan ke sebuah sistem Satu daya seimbang. **kawat netral tidak mengalirkan arus dan karenanya dapat dihilangkan dari sistem.** Artinya, hanya garis-R. garis-Y dan garis-B yang dibutuhkan untuk menghubungkan Satu daya ke beban. Beban-beban industrial pada umumnya seimbang. dan wajar bagi yang berwenang Dalam hal Satu daya listrik untuk menSatu jaringan industrial dengan sistem tiga-fase tiga-kawat.

Sistem Mesh atau Delta

Tiap-tiap kumparan pada suatu alternator tiga-fase dapat dianggap mempunyai titik "awal" dan titik "akhir". Jika "akhir" dari sebuah kumparan dihubungkan ke "awal" dari kumparan berikutnya. terbentuklah **hubungan mesh atau delta** dalam Gambar 3.5.



Gambar 2-18 Suatu sistem hubungan delta

Perhatikan bahwa didalam hubungan delta, kumparan "fase" generator dihubungkan di antara dua saluran;. artinya, kumparan fase yang membangkitkan tegangan disebut sebagai V_{BR} dihubungkan di antara saluran biru dan saluran merah dari sistem. Karena itu, dalam hal alternator hubungan -delta

Tegangan fase = tegangan saluran

$$V_P = V_L \dots\dots\dots (2-53)$$

Perhatikan pula bahwa, pada Gambar 1-18, dalam hal beban hubungan-delta, masing-masing "fase;" dari beban juga dihubungkan diantara sepasang garis satu daya. sehingga persamaan (2-53) juga berlaku terhadap beban.

Selanjutnya, dapat ditunjukkan bahwa, jika suatu beban hubungan-delta seimbang dihubungkan ke sebuah sistem satu daya seimbang, arus saluran dan arus fase dihubungkan oleh persamaan

Arus saluran = $\sqrt{3}$ x arus fase

$$I_L = \sqrt{3} I_P \dots\dots\dots (2-54)$$

Arus yang disebut I_{BR} , I_{RY} dan I_{YB} dalam Gambar 3.5 adalah arus fase, dan I_R , I_Y dan I_B adalah arus saluran.

Contoh 3.2

Tiga buah resistor masing-masing dengan resistansi 100 Ω dihubungkan a) secara bintang dan b) secara delta ke sebuah satu daya seimbang 440 V. Tentukan i) tegangan saluran dan tegangan fase untuk masing-masing hubungan, ii) arus saluran dan arus fase untuk masing-masing hubungan.

Penyelesaian :

Resistansi per fafse = 100 Ω , $V_L = 440V$

[Perhatikan Jika suatu sistem dikatakan sebagai sistem 440 V, maka yang dimaksud adalah tegangan saluran-ke-saluran].

a) Hubungan bintang

- i) $V_L = 440 V$
 $V_P = V_L / \sqrt{3} = 440 / \sqrt{3} = 254 V$
- ii) Arus pada tiap-tiap resistor = $V_P / 10 \Omega = 254 / 10 = 25,4 A$
 Karena itu $I_P = 25,4 A$
 dan $I_L = I_P = 25,4 A$

b) Hubungan delta

- i) $V_L = 440 V$
 $V_P = V_L = 440$
- ii) Arus pada tiap-tiap resistor = $V_P / 10 \Omega = 440 / 10 = 44 A$
 Karena itu $I_P = 44 A$
 dan $I_L = \sqrt{3} I_P = \sqrt{3} \times 44 = 76,21 A$

2.6. Ringkasan Hubungan pada Sistem Seimbang

Hubungan-hubungan yang diberikan dalam pasal-pasal sebelumnya diringkaskan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1

	Tegangan Len	Tegangan fasa	Arus Len	Arus fase
Bintang	$V_L = \sqrt{3} V_P$	$V_P = V_L / \sqrt{3}$	$I_L = I_P$	$I_P = I_L$
delta	$V_L = V_P$	$V_P = V_L$	$I_L = \sqrt{3} I_P$	$I_P = I_L / \sqrt{3}$

2.7. Volt-ampere, Daya dan VAr yang Dikonsumsi oleh Beban Tiga-fase Seimbang

Karena tiap fase dari beban seimbang mempunyai impedansi yang sama (baik magnitude maupun sudut fase), maka tiap fase mempunyai nilai arus yang sama pada susut fase yang sarna terhadap tegangan fasenya. Akibatnya untuk suatu beban tigafase seimbang,

V A total = 3 x VA yang dikonsumsi oleh satu fase

Daya total = 3 x daya yang dikonsumsi oleh satu fase

V Ar total = 3 x V Ar yang dikonsumsi oleh satu fase

Volt-ampere yang dikonsumsi

1. Dalam hal sistem hubungan-bintang, $V_p = V_L/\sqrt{3}$ dan $I_p = I_L$.
karena itu

VA per fase = $V_p I_p = V_L/\sqrt{3} \times I_L$ VA Karena itu

VA total yang dikonsumsi = 3 x VA per fase = $3 V_L I_L$ VA

2. Dalam hal sistem hubungan-delta, $V_p = V_L$ dan $I_p = I_L/\sqrt{3}$,
karena itu

VA per fase = $V_p I_p = V_L \times I_L/\sqrt{3}$ VA

dan

VA total yang dikonsumsi = 3 x VA per fase
= $\sqrt{3} V_L I_L$

Daya yang dikonsumsi

1. Dalam sistem hubungan-bintang
Daya per fase = $V_p I_p \cos \phi = V_L/\sqrt{3} \times I_L \cos \phi$ W
sehingga
Daya total yang dikonsumsi = 3 x daya per fase
= $\sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$ W

2. Untuk sistem hubungan-delta
Daya per fase = $V_p I_p \cos \phi = V_L \times (I_L/\sqrt{3}) \cos \phi$ W
sehingga
Daya total yang dikonsumsi = 3 x daya per fase
= $\sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$ W

V Ar yang dikonsumsi

1. Untuk sistem hubungan-bintang
V Ar per fase = $V_p I_p \sin \phi = V_L/\sqrt{3} \times I_L \sin \phi$ V Ar
Karena itu
VAr total yang dikonsumsi = 3 x VAr per fase
= $\sqrt{3} V_L I_L \sin \phi$ VAr
2. Untuk sistem hubungan-delta
V Ar per fase = $V_p I_p \sin \phi = V_L \times (I_L/\sqrt{3}) \sin \phi$ V Ar
Karena itu
VAr total yang dikonsumsi = 3 x VAr per fase
= $\sqrt{3} V_L I_L \sin \phi$ VAr

Contoh 3.3

Sebuah motor arus bolak balik bekerja dengan catu daya 440 V, 50 Hz. Motor memberikan keluaran mekanis beban-penuh sebesar 100 kW, dan jika bekerja dengan beban-penuh mempunyai faktor daya 0.88 dan efisiensi 0.909 p.u. Hitung a) daya masukan ke motor. b) arus saluran. e) VA total dan VAr total yang digunakan oleh motor.

Penyelesaian:

$V_L = 440$ V, $f = 50$ Hz, daya keluaran = 100×10^3 W, faktor daya = 0.88, efisiensi = 0.909.

a) Daya masukan $P = \text{daya keluaran/efisiensi}$
 $= 100 \times 10^3 / 0.909$
 $= 110 \times 10^3$ W atau 10 kW

b) Dari pers. (3.5), daya total $P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi$, karena itu
 $I_L = P / \sqrt{3}V_L \cos \phi$
 $= 110 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 440 \times 0.88) = 164$ A

c) Dari pers. (3.5)
Volt-ampere total $S = \sqrt{3}V_L I_L = \sqrt{3} \times 440 \times 164$
 $= 125 \times 10^3$ VA, atau 125 kVA

Karena $\cos \phi = 0.88$, maka $\phi = 28.36^\circ$ dan $\sin \phi = 0.475$, karena itu
 $Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin \phi = \sqrt{3} \times 440 \times 164 \times 0.475$
 $= 59368$ VAr = 59.368 kVAr

Catatan.

$$\sqrt{(P^2 + S^2)} = \sqrt{(110^2 + 59.368^2)} = 125 \text{ kVA} = S$$

Contoh 3.4

Tiga buah gulungan yang identik dihubungkan secara delta ke suatu catu daya 440 V, tiga-fase yang mengkonsumsi daya total sebesar 4.646 kW dan menarik arus saluran sebesar 7.62 A. Tentukan a) faktor daya dari beban. b) arus fase. e) impedansi dari masing-masing gulungan. d) VA total yang dikonsumsi. e) VAr total yang dikorisumsi. Dan f) daya yang dikonsumsi jika ketiga gulungan dihubungkan secara bintang ke satu daya yang sama.

Penyelesaian:

$V_L = 440$ V, $P = 4646$ W, $I_L = 7.62$ A

a) Dari pers. (3.5) daya yang digunakan adalah $P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi$, karena itu

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya, } \cos \phi &= P / \sqrt{3}V_L I_L \\ &= 4646 / (\sqrt{3} \times 440 \times 7.62) \\ &= 0.8 \end{aligned}$$

Faktor daya dinyatakan sebagai faktor daya ketinggalan karena bebannya induktif.

b) Karena beban dihubungkan secara delta, maka

$$I_p = I_L/\sqrt{3} = 7.62/\sqrt{3} = 4.4 \text{ A}$$

c) Impedansi dari masing-masing gulungan digunakan oleh impedansi fase $= V_p/I_p$, dimana untuk beban hubungan delta sama dengan V_L/I_p , karena itu

$$\text{Impedansi fase} = V_L/I_p = 440/4.4 = 100 \ \Omega$$

d) Dari pers. (3.5)

$$\begin{aligned} \text{VA total yang dikonsumsi } S &= \sqrt{3}V_L I_L \\ &= \sqrt{3} \times 440 \times 7.62 = 5807 \text{ VA} \end{aligned}$$

e) Juga dari pers. (3.5). $S^2 = P^2 + Q^2$, karena itu

$$\begin{aligned} \text{VAR total yang dikonsumsi } Q &= \sqrt{(S^2 - P^2)} \\ &= \sqrt{(5807^2 - 4646^2)} \\ &= 3484 \text{ VAR} \end{aligned}$$

f) Jika gulungan dihubungkan secara bintang, tegangan yang melalui masing-masing gulungan adalah

$$V_p = V_L/\sqrt{3} = 440/\sqrt{3} = 254 \text{ V}$$

Karena itu

$$\text{Arus fase } I_p = V_p/100 \ \Omega = 254/100 = 2.54 \text{ A}$$

Selanjutnya, untuk beban hubungan-bintang, $I_L = I_p = 2.54 \text{ A}$. Karena itu, jika gulungan dihubungkan secara bintang, daya yang dikonsumsi adalah

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi \\ &= \sqrt{3} \times 440 \times 2.54 \times 0.8 = 1548.6 \text{ W} \end{aligned}$$

Bandingkan hasil di atas dengan daya yang dikonsumsi jika gulungan dihubungkan secara delta. gulungan mengkonsumsi daya tiga kali lebih besar dalam hubungan delta dibandingkan daya yang dikonsumsi untuk hubungan bintang.

2.8. Daya yang Dikonsumsi oleh Seban Tiga-fase Tak Seimbang.

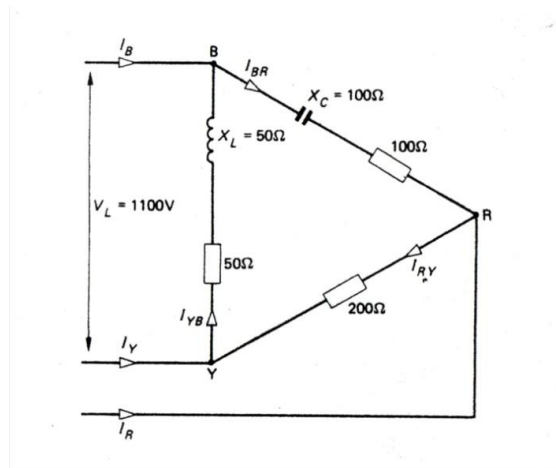
Daya yang dikonsumsi oleh satu fase dari sebuah beban tiga-fase diberikan oleh Daya pada satu fase = tegangan fase x arus fase x faktor daya dari beban pada fase itu dan daya total yang dikonsumsi oleh beban tiga-fase adalah

Daya total = jumlah daya yang dikonsumsi oleh masing-masing fase (3.7)

Catalan. Untuk setiap beban tak seimbang, hubungan dalam persamaan (3.5) tak dapat digunakan.

Contoh 3.5

Untuk rangkaian pada Gambar 3.6 hitung a) daya yang dikonsumsi oleh masing-masing fase dari beban dan b) daya total yang dikonsumsi oleh rangkaian.



Gambar 2-19. Rangkaian

Penyelesaian:

Untuk fase B-R

$$Z_{BR} = \sqrt{(X_C^2 + 100^2)} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141,4$$

karena itu

$$I_{BR} = V_L / Z_{BR} = 1100 / 141,4 = 7,78 \text{ A}$$

Untuk fase Y-B

$$Z_{YB} = \sqrt{(X_L^2 + 50^2)} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 70,7 \text{ Q}$$

karena itu

$$I_{YB} = V_L / Z_{YB} = 1100 / 70,7 = 15,56 \text{ A}$$

Untuk fase R-Y

$$Z_{RY} = 200 \text{ Q}$$

karena itu

$$I_{RY} = V_L / Z_{RY} = 1100 / 200 = 5,5 \text{ A}$$

- a) Daya yang dikonsumsi oleh masing-masing fase dihitung dari persamaan berikut

Daya pada satu fase = (arus fase)² x resistansi fase

Untuk fase **B-R**, daya = 7,78² x 100 = 6.053 W

Untuk fase **Y-B**, daya = 15,56² x 50 = 12.106 W

Untuk fase **R-Y**, daya = 5,5² x 200 = 6.050 W

- b) Daya total = jumlah daya yang dikonsumsi oleh masing-masing fase
 = 6.053 + 12.106 + 6.050 = 24.209 W

Latihan soal-soal

1. sebuah resistor murni dengan resistansi 50 dihubungkan secara parallel dengan induktansi 40Ω , hubungan ini diberi catu daya AC 200 V RMS.

Tentukan:

- a) arus di setiap cabang dari rangkaian,
 - b) arus total yang dihasilkan oleh catu daya,
 - c) sudut fase antara tegangan catu daya dan arus yang dihasilkan oleh rangkaian,
 - d) volt-ampere yang dikonsumsi oleh rangkaian,
 - e) daya yang dikonsumsi oleh rangkaian,
 - f) faktor daya dari rangkaian, dan
 - g) VAr yang dikonsumsi.
2. Gambarkan diagram fasor dari rangkaian dengan skala.
[a] $I_r = 4 \text{ A}$, $I_1 = 5 \text{ A}$, b) 6,403 A, c) $51,34^\circ$ (I ketinggalan terhadap V_s), d) 1280,6 VA, e) 800 W, f) 0,625 (ketinggalan), g) 1000 VAr].
 3. sebuah kapasitor dengan reaktansi 40 dihubungkan secara paralel dengan sebuah resistor dengan resistansi 30, rangkaian ini dihubungkan ke sebuah catu daya AC 90 V RMS. Hitung a) arus di setiap cabang dari rangkaian, b) arus total yang dihasilkan oleh catu daya, c) sudut fase antara tegangan catu daya dan arus yang dihasilkan oleh rangkaian, d) volt-ampere yang dikonsumsi oleh rangkaian, e) daya yang dikonsumsi oleh rangkaian, f) faktor daya dari rangkaian, dan g) VAr yang dikonsumsi. Gambarkan diagram fasor dari rangkaian dengan skala.
[a] $I_r = 3 \text{ A}$, $I_c = 2,25 \text{ A}$, b) 3,75 A, c) $36,87^\circ$ (I mendahului terhadap V_s), d) 337,5 VA, e) 270 W, f) 0,8 (mendahului), g) 202,5 VAr].
 4. Tiga buah rangkaian berikut ini dihubungkan secara paralel ke sebuah catu daya 14,14 V RMS.
Rangkaian 1 $R_1 = 10 \Omega$ seri dengan $X_L = 10 \Omega$
Rangkaian 2 $R_2 = 20 \Omega$
Rangkaian 3 $R_3 = 20 \Omega$ seri dengan $X_C = 20 \Omega$
Tentukan besarnya arus di setiap cabang dan juga resultan arus yang dihasilkan dari catu daya. Hitung pula sudut fasa dari masing-masing arus terhadap tegangan catu. Gambarkan diagram fasor dari rangkaian dengan skala.
[$I_1 = 7,07 \text{ A}$ (ketinggalan terhadap V_s sebesar 45°), $I_2 = 5 \text{ A}$ (sefase dengan V_s), $I_3 = 3,353 \text{ A}$ (mendahului terhadap V_s sebesar 45°), $I = 12,75 \text{ A}$ (ketinggalan terhadap V_s sebesar $11,31^\circ$).
 5. sebuah motor AC fasa tunggal menghasilkan arus beban penuh sebesar 40 A pada faktor daya 0,85 ketinggalan terhadap sebuah catu daya 500 V, 50 Hz. Hitung arus yang dihasilkan oleh rangkaian jika motor dalam keadaan penuh. Tentukan pula faktor daya dari rangkaian. Gambarkan diagram fasornya dengan skala. 35,05 A, 0,97 ketinggalan.
 6. Sebuah rangkaian seri terdiri dari sebuah resistor dengan resistansi 10Ω , sebuah inductor dengan reaktansi 20Ω , dan sebuah kapasitor dengan reaktansi 30Ω .

tentukan ; a) impedansi dari suatu rangkaian jika rangkaian dihubungkan dengan satu fasa tunggal. 141,4 V hitung b) arus didalam rangkaian , c) sudut fasa dari arus terhadap tegangan yang terpasang , d) tegangan yang melalui masing –masing elemen dalam rangkaian.dan e) VA, daya dan V ar yang dikosumsi oleh rangkaian, gambarkan diagram fasor dari rangkaian dengan skala.

a) $14,14 \Omega$, b) 10 A. c) I mendahului V sebesar 45° , d) $V_R=141,4 \text{ V}$, $V_L=282,8 \text{ V}$.
 $V_c=424,2 \text{ V}$, e) 141,4 VA, 1000 W, 1000 V Ar.

7. Sebuah rangkaian seri terdiri dari sebuah resistor dengan resistansi . 30Ω seri dengan sebuah induktor dengan induktansi 0,1 H dan suatu kapasitansi $16,67 \mu\text{F}$, tegangan satu daya sebesar 200 V, 159,2 Hz. Hitung a) reaktansi dari induktans, b) reaktansi dari kapasitor , c) impedansi dari rangkaian, d) faktor daya dari rangkaian, e) arus di dalam rangkaian, f) daya yang dikonsumsi oleh rangkaian, dan g) tegangan yang melalui setiap elemen rangkaian. Gambarkan diagram fasor dari rangkaian dengan skala.

a) 100Ω , b) 60Ω , c) 50Ω , d) 0,6 ketinggalan, e) 4 A, f) 480 W, g) $V_R=120 \text{ V}$,
 $V_L=400 \text{ V}$, $V_c=240 \text{ V}$.