



**Open Course**

# **Analisis Harmonisa**

**Oleh: Sudaryatno Sudirham**



## Pengantar

Penyediaan energi listrik pada umumnya dilakukan dengan menggunakan sumber tegangan berbentuk gelombang sinus. Arus yang mengalir diharapkan juga berbentuk gelombang sinus pula.

Namun perkembangan teknologi yang terjadi di sisi beban membuat arus beban tidak lagi berbentuk gelombang sinus.

Bentuk-bentuk gelombang arus ataupun tegangan yang tidak berbentuk sinus, namun tetap periodik, tersusun dari gelombang-gelombang sinus dengan berbagai frekuensi; bentuk gelombang ini tersusun dari harmonisa-harmonisa



## **Cakupan Bahasan**

- **Sinyal Nonsinus**
- **Pembebanan Non Linier**
- **Tinjauan Di Kawasan Fasor**
- **Dampak Harmonisa Pada Piranti**
- **Harmonisa Pada Sistem Tiga Fasa**



---

## BAB 1

# Sinyal Nonsinus

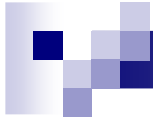
Tinjauan di Kawasan Waktu

# Sinyal Nonsinus

Kita akan menggunakan istilah *sinyal nonsinus* untuk menyebut secara umum sinyal periodik yang tidak berbentuk sinus. Kita sudah mengenal bentuk gelombang seperti ini misalnya bentuk gelombang gigi gergaji dan sebagainya, namun dalam istilah ini kita masukkan pula pengertian ***sinus terdistorsi*** yang terjadi di sistem tenaga

Apabila persamaan sinyal nonsinus diketahui, tidaklah terlalu sulit mencari spektrum amplitudo dan spektrum sudut fasa

Apabila persamaan sinyal nonsinus sulit ditentukan, maka kita menentukan spektrum amplitudo sinyal dengan pendekatan numerik



# Pendekatan Numerik

# Sinyal Nonsinus, Pendekatan Numerik

Jika  $f(t)$  adalah fungsi periodik yang memenuhi persyaratan Dirichlet, maka  $f(t)$  dapat dinyatakan sebagai deret Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(n\omega_0 t - \varphi_n) \right]$$

↑  $\tan \varphi_n = \frac{b_n}{a_n}$

dengan Koefisien Fourier

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad ; \quad n > 0$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad ; \quad n > 0$$



# Sinyal Nonsinus, Pendekatan Numerik

## ***Pendekatan Numerik Spektrum Sinyal Nonsinus***

Koefisien Fourier

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) dt$$

luas bidang yang dibatasi oleh kurva  $y(t)$  dengan sumbu- $t$  dalam rentang satu perioda

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) \cos(n\omega_0 t) dt ; n > 0$$

luas bidang yang dibatasi oleh kurva  $y(t) \cos(n\omega_0 t)$  dengan sumbu- $t$  dalam rentang satu perioda

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} y(t) \sin(n\omega_0 t) dt ; n > 0$$

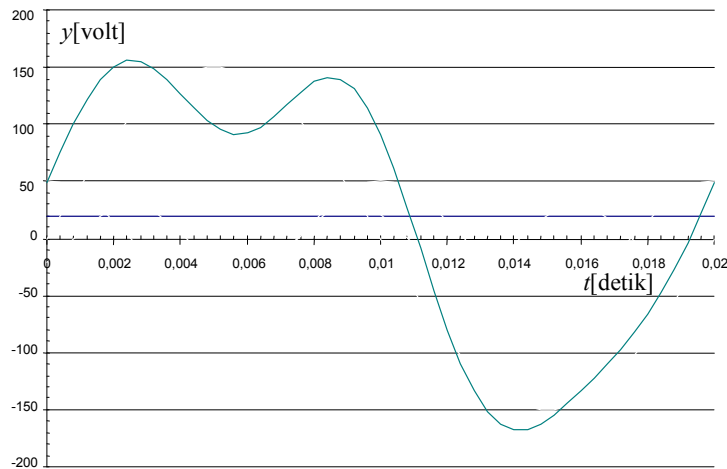
luas bidang yang dibatasi oleh kurva  $y(t) \sin(n\omega_0 t)$  dengan sumbu- $t$  dalam rentang satu perioda

Dengan penafsiran bentuk integral sebagai luas bidang, setiap bentuk sinyal periodik dapat dicari koefisien Fourier-nya, yang berarti pula dapat ditentukan spektrumnya

**Dalam praktik, sinyal nonsinus diukur dengan menggunakan alat ukur elektronik yang dapat menunjukkan langsung spektrum amplitudo dari sinyal nonsinus yang diukur**

# Sinyal Nonsinus, Pendekatan Numerik

## CONTOH-1.1.



$$a_0 = 19,90$$

$$a_1 = 0,36; b_1 = 150,05 \Rightarrow A_1 = \sqrt{0,36^2 + 150,05^2} = 150,05$$

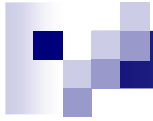
$$\varphi_1 = \tan^{-1}(150,05 / 0,36) = 1,57$$

$$a_3 = -21,18; b_3 = 21,13 \Rightarrow A_3 = \sqrt{(-21,18)^2 + 21,13^2} = 29,92$$

$$\varphi_3 = \tan^{-1}(21,13 / -21,18) = -0,78$$

Analisis Harmonisa Sinyal Nonsinus pada Contoh

$T_0 = 0,02$ s $\Delta t_k = 0,0004$ s		Komp. searah	Fundamental $f_0 = 1/T_0 = 50$ Hz		Harmonisa ke-3	
$t$	$A_k$	$L_{ka0}$	$L_{ka1}$	$L_{kb1}$	$L_{ka3}$	$L_{kb3}$
0	50					
0,0004	75	0,025	0,025	0,002	0,024	0,006
0,0008	100	0,035	0,034	0,007	0,029	0,019
0,0012	120	0,044	0,042	0,014	0,025	0,035
:	:	:	:	:	:	:
0,0192	-5	-0,006	-0,006	0,002	-0,003	0,005
0,0196	20	0,003	0,003	0,000	0,003	-0,001
0,02	50	0,014	0,014	-0,001	0,014	-0,001
Jumlah $L_k$		0,398	0,004	1,501	-0,212	0,211
$a_0$		19,90				
$a_1, b_1$			0,36	150,05		
$a_3, b_3$					-21,18	21,13
Ampli-1, $\varphi_1$			150,05	1,57		
Ampli-3, $\varphi_3$					29,92	-0,78



# **Elemen Linier dan Sinyal Non-sinus**

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier Dan Sinyal Nonsinus

Relasi tegangan-arus elemen-elemen linier berlaku pula untuk sinyal nonsinus.

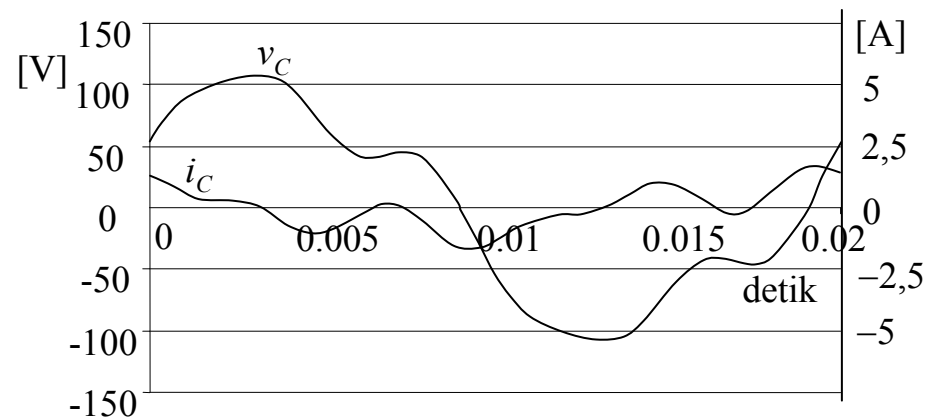
## CONTOH-1.2.

Satu kapasitor  $C = 30 \mu\text{F}$  mendapatkan tegangan nonsinus pada frekuensi  $f = 50 \text{ Hz}$

$$v_C = 100 \sin(\omega t + 0,5) + 20 \sin(3\omega t - 0,2) + 10 \sin(5\omega t + 1,5)$$

$$i_C = C \frac{dv}{dt}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow i_C &= C \frac{d\{100 \sin(\omega t + 0,5) + 20 \sin(3\omega t - 0,2) + 10 \sin(5\omega t + 1,5)\}}{dt} \\ &= 100\omega C \cos(\omega t + 0,5) + 60\omega C \cos(3\omega t - 0,2) \\ &\quad + 50\omega C \cos(5\omega t + 1,5) \text{ A} \end{aligned}$$



# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

**Nilai Rata-Rata**  $Y_{rr} = \frac{1}{T_0} \int_0^T y(t) dt$

**Nilai Efektif**  $Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T y^2(t) dt}$

**Untuk sinyal nonsinus**  $y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{mn} \sin(n\omega_0 t + \theta_n)$

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T \left( Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{mn} \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \right)^2 dt}$$

$$Y_{rms}^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^T \left( Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{mn} \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \right)^2 dt$$

$$Y_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T Y_0^2 dt + \underbrace{\dots}_{\text{bernilai nol}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T Y_{nm}^2 \sin^2(n\omega_0 t + \theta_n) dt$$

$$Y_{rms}^2 = Y_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{nrms}^2$$

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

$$Y^2_{rms} = Y_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{nrms}^2$$

$$Y^2_{rms} = Y_{1rms}^2 + Y_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Y_{nrms}^2$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{Y^2_{hrms}}$

$$Y^2_{rms} = Y_{1rms}^2 + Y^2_{hrms}$$

Kwadrat nilai rms  
**sinyal nonsinus**

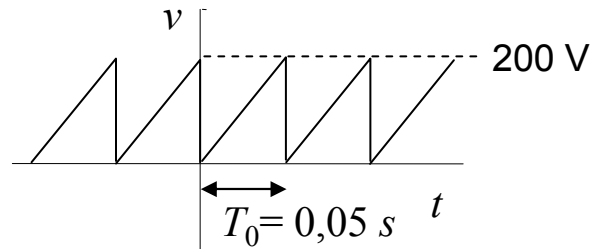
Kwadrat nilai rms  
**komponen fundamental**

Kwadrat nilai rms  
**harmonisa total**

Di sini sinyal nonsinus  
dipandang sebagai terdiri  
dari 2 komponen yaitu:  
**komponen fundamental**  
dan  
**komponen harmonisa total**

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

## Contoh-1.3.



Uraian suatu sinyal gigi gergaji sampai harmonisa ke-7 adalah:

$$v(t) = 10 - 6,366 \sin \omega_0 t - 3,183 \sin 2\omega_0 t - 2,122 \sin 3\omega_0 t - 1,592 \sin 4\omega_0 t - 1,273 \sin 5\omega_0 t - 1,061 \sin 6\omega_0 t - 0,909 \sin 7\omega_0 t \quad \text{V}$$

fundamental

harmonisa total

Maka:  $V_{1rms} = \frac{6,366}{\sqrt{2}} \approx 4,5 \text{ V}$

Nilai efektif komponen fundamental

$$V_{hrms} = \sqrt{10^2 + \frac{3,183^2}{2} + \frac{2,122^2}{2} + \frac{1,592^2}{2} + \frac{1,273^2}{2} + \frac{1,061^2}{2} + \frac{0,909^2}{2}} \approx 10,7 \text{ V}$$

Nilai efektif komponen harmonisa total

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{4,5^2 + 10,7^2} \approx 11,6 \text{ V}$$

Nilai efektif sinyal nonsinus

Nilai efektif harmonisa jauh lebih tinggi dari nilai efektif fundamental

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

**Contoh-1.4.** Uraian dari penyearahan setengah gelombang arus sinus  $i = \sin \omega_0 t$  A sampai dengan harmonisa ke-10 adalah

$$i(t) = 0,318 + 0,5 \cos(\omega_0 t - 1,57) + 0,212 \cos(2\omega_0 t) + 0,042 \cos(4\omega_0 t) \\ + 0,018 \cos(6\omega_0 t) + 0,010 \cos(8\omega_0 t) + 0,007 \cos(10\omega_0 t) \text{ A}$$

$$I_{1rms} = \frac{0,5}{\sqrt{2}} = 0,354 \text{ A}$$

$$I_{hrms} = \sqrt{0,318^2 + \frac{0,212^2}{2} + \frac{0,042^2}{2} + \frac{0,018^2}{2} + \frac{0,01^2}{2} + \frac{0,007^2}{2}} = 0,354 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{0,354^2 + 0,354^2} \approx 0,5 \text{ A}$$

Pada penyearahan setengah gelombang nilai efektif komponen fundamental sama dengan nilai efektif komponen harmonisanya



# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

## Contoh-1.5.

Tegangan pada sebuah kapasitor  $20 \mu\text{F}$  terdiri dari dua komponen, yaitu komponen fundamental dan harmonisa ke-15

$$v_1 = 200 \sin \omega t \quad v_{15} = 20 \sin 15\omega t \quad \text{pada frekuensi } 50 \text{ Hz.}$$

$$i_1 = 20 \times 10^{-6} dv_1 / dt = 20 \times 10^{-6} \times 200 \times 100\pi \cos 100\pi t = 1,257 \cos 100\pi t$$

$$\longrightarrow I_{1rms} = \frac{1,257}{\sqrt{2}} = 0,89 \text{ A}$$

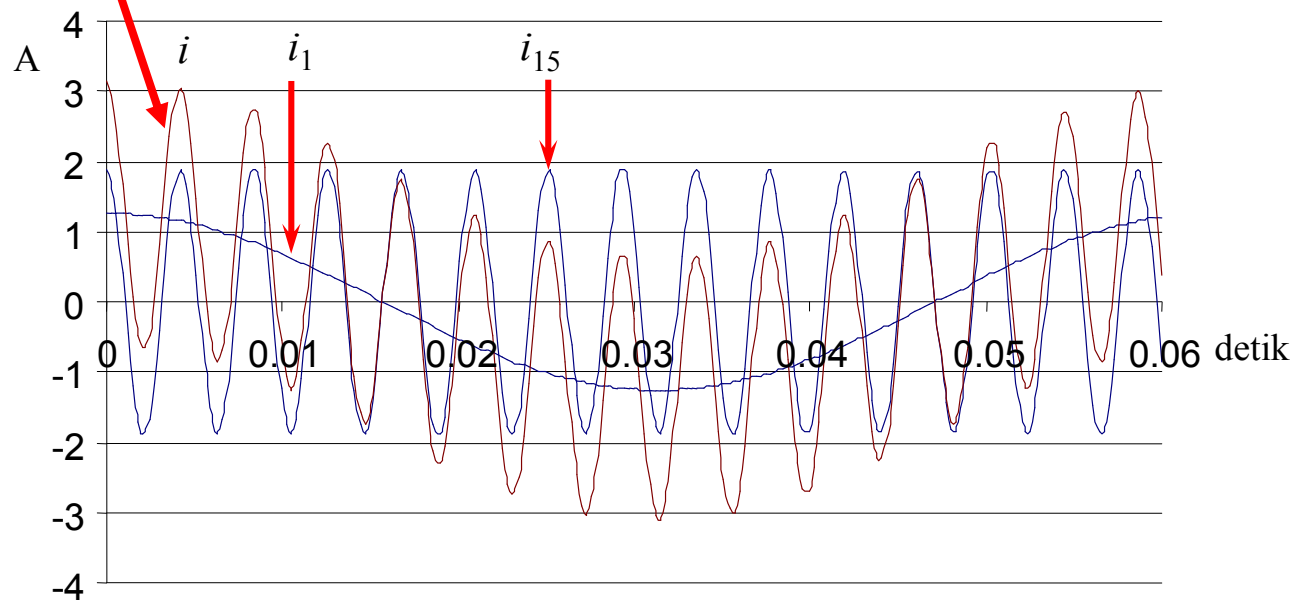
$$i_{15} = 20 \times 10^{-6} dv_{15} / dt = 20 \times 10^{-6} \times 20 \times 1500\pi \sin 1500\pi t = 1,885 \cos 1500\pi t$$

$$\longrightarrow I_{15rms} = \frac{1,885}{\sqrt{2}} = 1,33 \text{ A}$$

$$\longrightarrow I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{15rms}^2} = \sqrt{0,89^2 + 1,33^2} = 1,60 \text{ A}$$

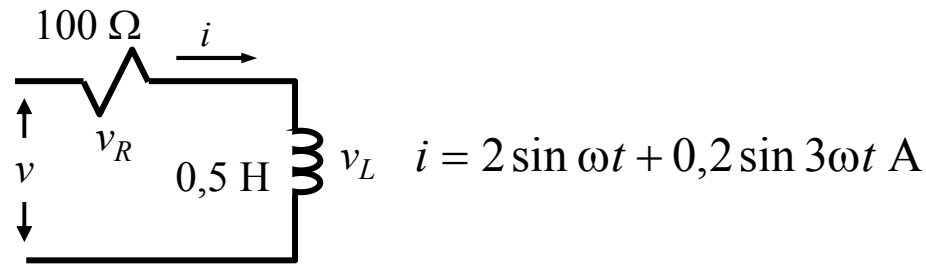
# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

Arus kapasitor  $i$  berupa arus berfrekuensi harmonisa ke-15 yang bersilasi pada frkuensi fundamental



# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

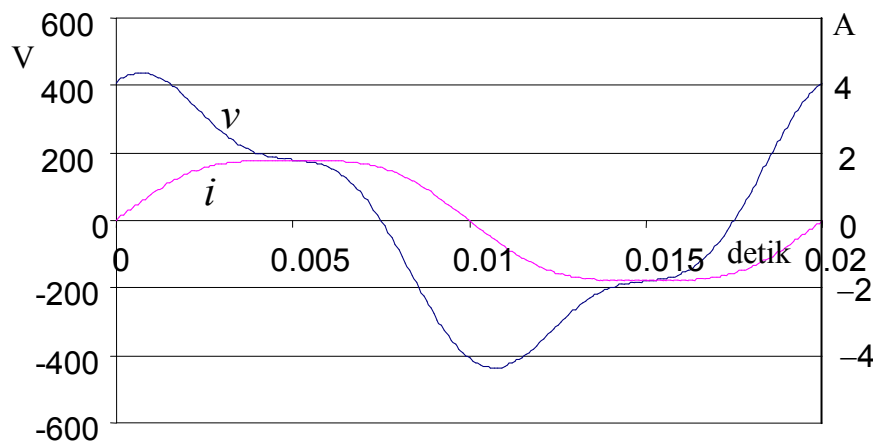
Contoh-1.6.



$$I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{3rms}^2} = \sqrt{\frac{2^2}{2} + \frac{0,2^2}{2}} = 1,42 \text{ A}$$

$$v = v_R + v_L = iR + L \frac{di}{dt} = 200 \sin \omega t + 20 \sin 3\omega t + \omega \cos \omega t + 0,3\omega \cos 3\omega t \text{ V}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{200^2}{2} + \frac{20^2}{2} + \frac{\omega^2}{2} + \frac{(0,3\omega)^2}{2}} = 272 \text{ V}$$



Pada sinyal nonsinus, bentuk kurva tegangan kapasitor berbeda dengan bentuk kurva arusnya.

Pada sinyal sinus hanya berbeda sudut fasanya.

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

## *Daya Pada Sinyal Nonsinus*

Pengertian daya nyata dan daya reaktif pada sinyal sinus berlaku pula pada sinyal nonsinus

Daya nyata memberikan transfer energi netto, sedangkan daya reaktif tidak memberikan transfer energi netto

Jika resistor  $R_b$  menerima arus berbentuk gelombang nonsinus

$$i_{Rb} = i_1 + i_h$$

arus efektifnya adalah  $I_{Rbrms}^2 = I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2$

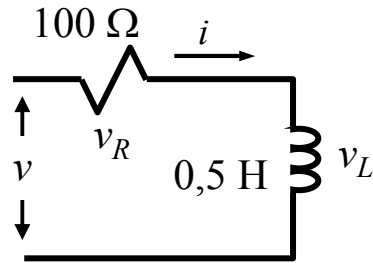
Daya nyata yang diterima oleh  $R_b$  adalah

$$P_{Rb} = I_{Rbrms}^2 \times R_b = I_{1rms}^2 R_b + I_{hrms}^2 R_b$$

**Relasi ini tetap berlaku sekiranya resistor ini terhubung seri dengan induktansi, karena dalam bubungan seri tersebut daya nyata diserap oleh resistor, sementara induktor menyerap daya reaktif.**

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

**Contoh-1.7.**



$$i = 2 \sin \omega t + 0,2 \sin 3\omega t \text{ A}$$

$$I_{rms} = 1,42 \text{ A} \quad (\text{contoh-1.6.})$$

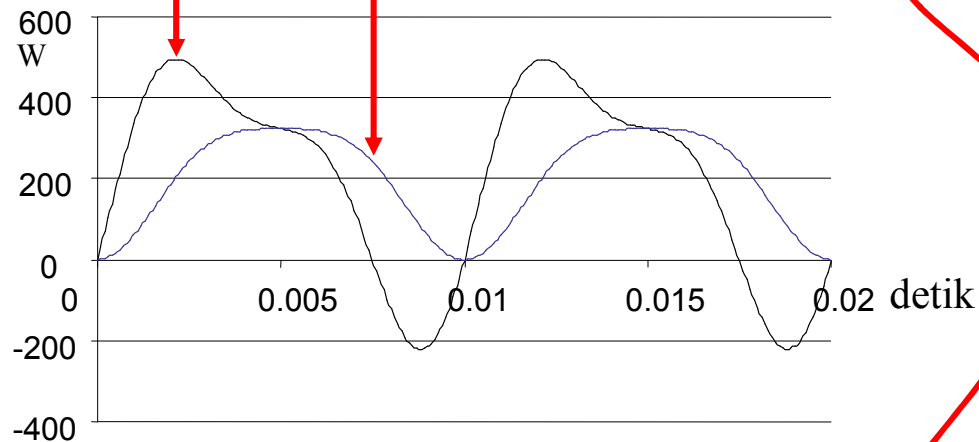
(kurva daya masuk ke rangkaian,  
kadang positif kadang negatif)  $p = vi$

↓  
daya positif = masuk  
ke rangkaian

daya negatif = diberikan  
oleh rangkaian  
(daya reaktif)

$$p_R = i^2 R = v_R i_R$$

(kurva daya yang  
diserap R, selalu positif)

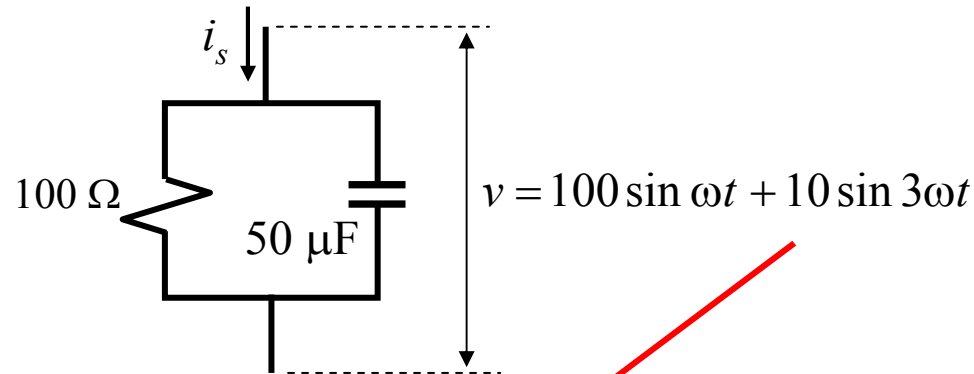


$$P_{rata2} = 202 \text{ W}$$

$$P_R = I_{rms}^2 R = (1,42)^2 \times 100 = 202 \text{ W}$$

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

## Contoh-1.8.



$$i_R = \frac{v}{R} = \sin \omega t + 0,1 \sin 3\omega t$$

$$i_C = C \frac{dv}{dt} = 50 \times 10^{-6} (100\omega \cos \omega t + 30\omega \cos 3\omega t)$$

$$i_s = \sin \omega t + 0,1 \sin 3\omega t + 0,005 \cos \omega t + 0,0015\omega \cos 3\omega t$$

$$I_{Rrms} = \sqrt{\frac{1^2}{2} + \frac{0,1^2}{2}} = 0,71 \text{ A} \Rightarrow P_R = 0,71^2 \times 100 = 50 \text{ W}$$

# Sinyal Nonsinus, Elemen Linier dengan Sinyal Nonsinus

## ***Resonansi***

Karena sinyal nonsinus mengandung harmonisa dengan berbagai macam frekuensi, maka ada kemungkinan salah satu frekuensi harmonisa bertepatan dengan frekuensi resonansi dari rangkaian

Frekuensi resonansi  $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

**CONTOH-1.9.** Generator 50 Hz dengan induktansi internal 0,025 H mencatu daya melalui kabel yang memiliki kapasitansi total sebesar 5  $\mu$ F

Frekuensi resonansi  $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{0,025 \times 5 \times 10^{-6}}} = 2828,4$

$$f_r = \frac{2828,4}{2\pi} = 450 \text{ Hz}$$

Inilah frekuensi harmonisa ke-9

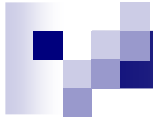


---

## BAB 2

# Pembebanan Non Linier

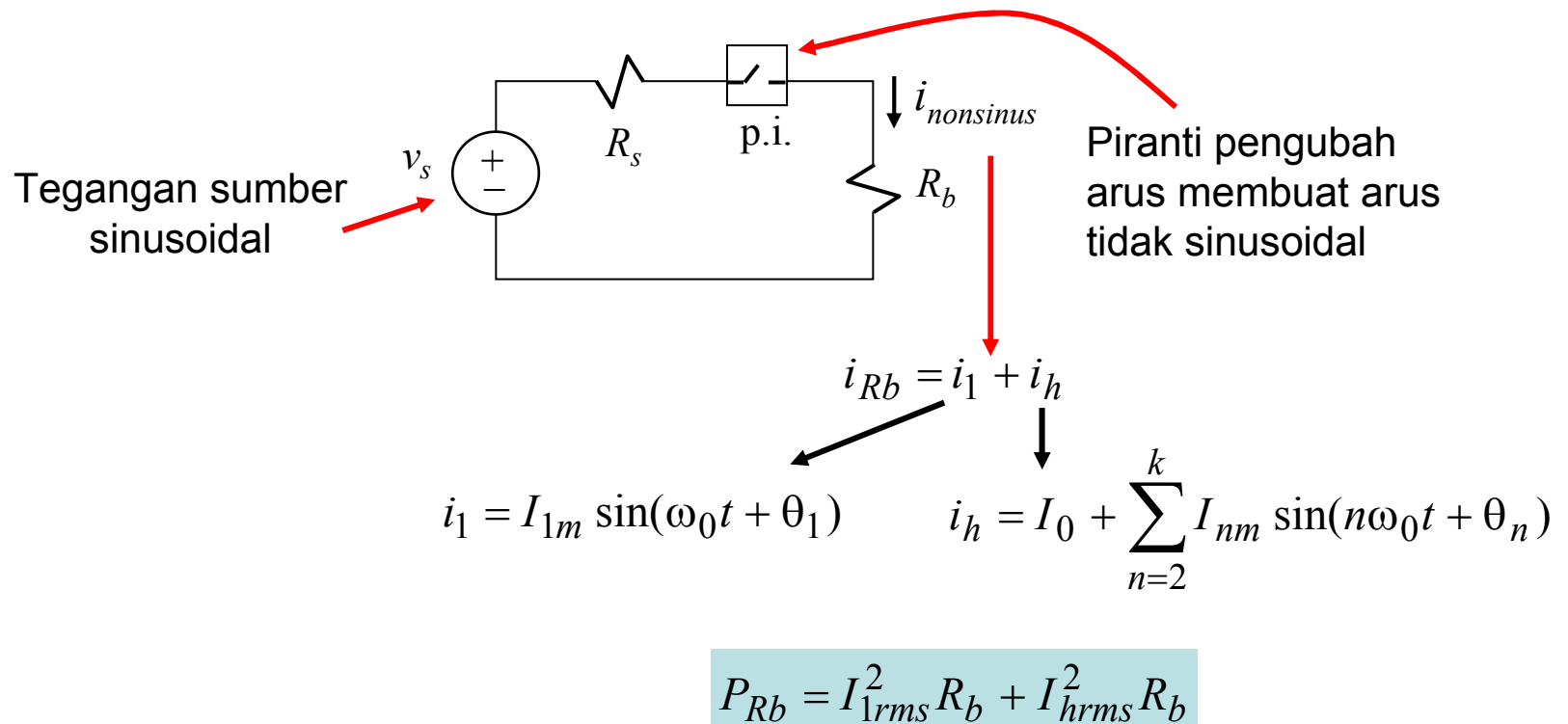




# **Tinjauan Sisi Beban Dan Sisi Sumber**

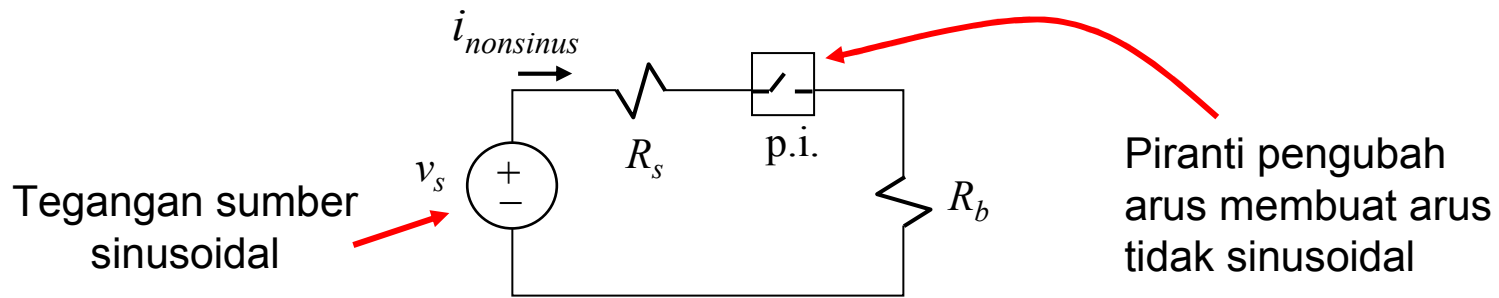
# Pembebanan Non-Linier, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

## Tinjauan Di Sisi Beban



# Pembebanan Non-Linear, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

## Tinjauan Di Sisi Sumber



$$p_s = v_s(t)i_s(t)$$

$$= \underbrace{(V_s \sin \omega_0 t)(I_1 \sin(\omega_0 t + \theta_1))}_{p_{s1}} + \underbrace{V_s \sin \omega_0 t \left( I_0 + \sum_{n=2}^k I_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \right)}_{p_{sh}}$$

$$p_{s1} = \frac{V_s I_1}{2} \cos \theta_1 - \frac{V_s I_1}{2} \cos(2\omega_0 t + \theta_1)$$

memberikan transfer energi netto

$$p_{sh} = \underbrace{V_s I_0 \sin \omega_0 t}_{\text{nilai rata-rata nol}} + \underbrace{V_s \sum_{n=2}^{\infty} [I_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \sin \omega_0 t]}_{\text{nilai rata-rata nol}}$$

nilai rata-rata nol

nilai rata-rata nol

tidak memberikan transfer energi netto

$$p_s = p_{s1} + p_{sh}$$

# Pembebanan Non-Linier, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

$$p_s = p_{s1} + p_{sh}$$

memberikan transfer energi netto

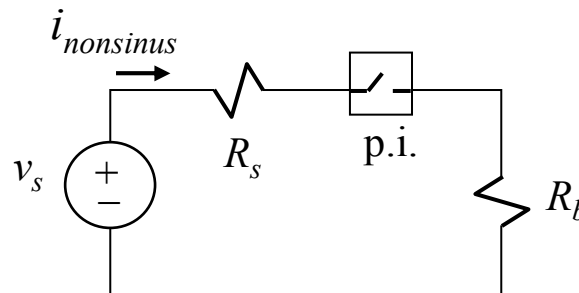
tidak memberikan transfer energi netto

$$P_{s1} = \frac{V_s I_1}{2} \cos \theta_1 = V_{srms} I_{1rms} \cos \theta_1$$

Daya reaktif

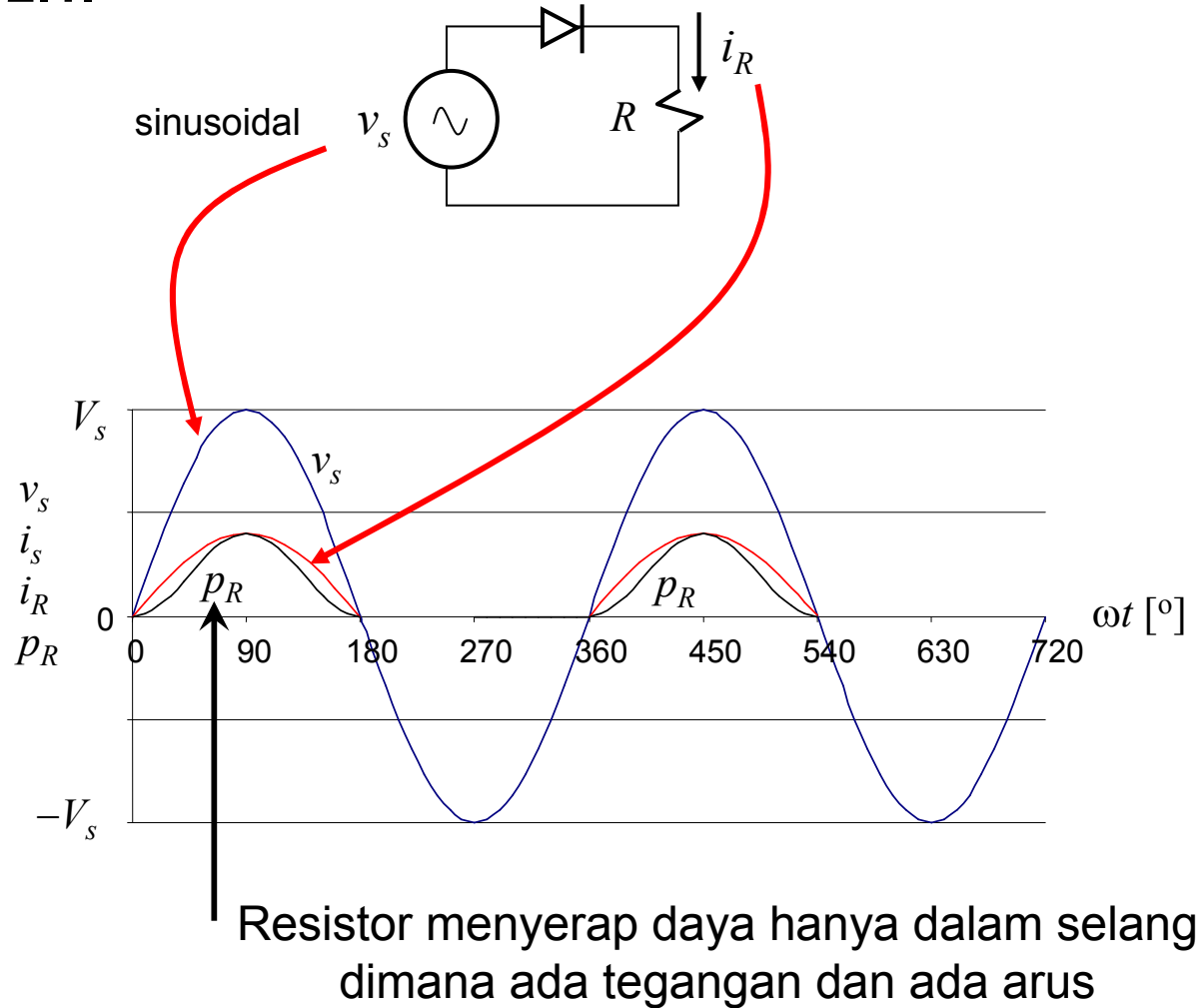
beda susut fasa antara  $v_s$  dan  $i_1$

$P_{s1}$  haruslah diserap oleh  $R_b$  dan  $R_s$



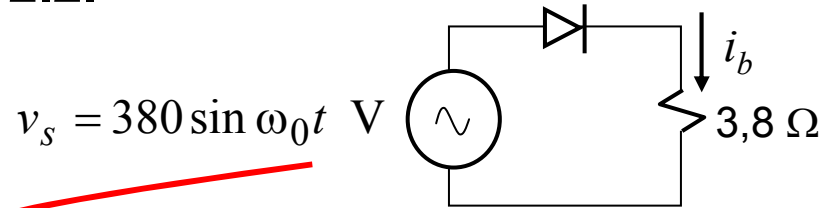
# Pembebanan Non-Linier, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

## Contoh-2.1.



# Pembebanan Non-Linear, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

## Contoh-2.2.

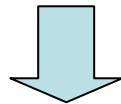


$$I_{maks} = \frac{380}{3,8} = 100 \text{ A} \Rightarrow i(t) = \left( \begin{array}{l} 31,8 + 50 \cos(\omega_0 t - 1,57) + 21,2 \cos(2\omega_0 t) \\ + 4,2 \cos(4\omega_0 t) + 1,8 \cos(6\omega_0 t) \end{array} \right) \text{ A}$$

$$i_{1s} = i_{1Rb} = 50 \cos(\omega_0 t - 1,57) = 50 \sin \omega_0 t$$

$$I_{1srms} = 50 / \sqrt{2} \text{ A}$$

$$P_{s1} = V_{s \text{ rms}} I_{1s \text{ rms}} = \frac{380}{\sqrt{2}} \times \frac{50}{\sqrt{2}} = 9,5 \text{ kW}$$



$$I_{b1rms} = \frac{50}{\sqrt{2}} \text{ A};$$

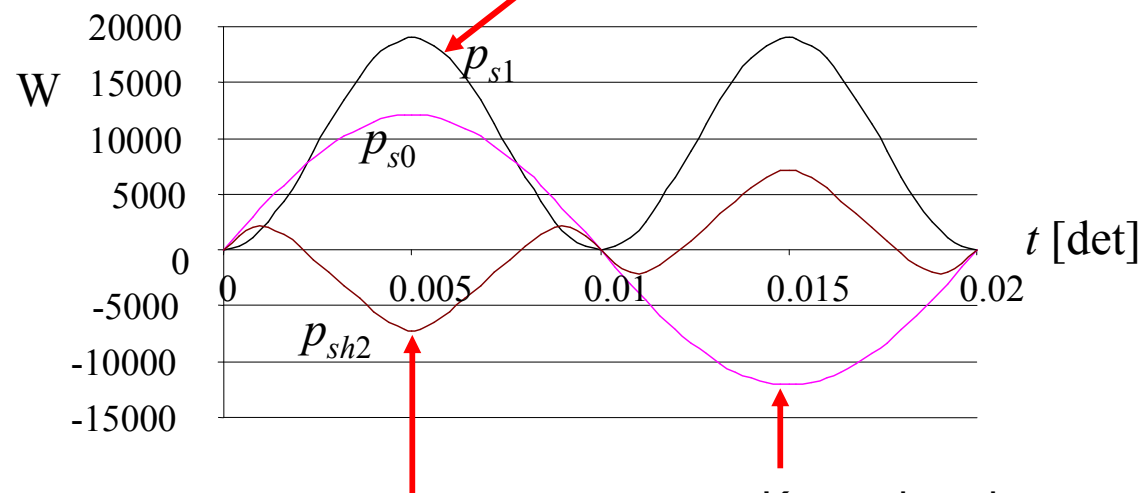
$$I_{bhrms} = \sqrt{31,8^2 + \frac{21,2^2}{2} + \frac{4,2^2}{2} + \frac{1,8^2}{2}} = 35,31 \text{ A};$$

$$P = I_{rms}^2 R_b = (I_{b1rms}^2 + I_{bhrms}^2) \times 3,8 \\ = 9488 \text{ W} \approx 9,5 \text{ kW}$$

# Pembebanan Non-Linier, Tinjauan di Sisi Beban dan Sisi Sumber

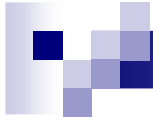


Kurva daya komponen fundamental selalu positif



Kurva daya komponen harmonisa mulai harmonisa ke-2, simetris terhadap sumbu  $t$ , nilai rata-rata nol

Kurva daya komponen searah, sinusoidal, nilai rata-rata nol

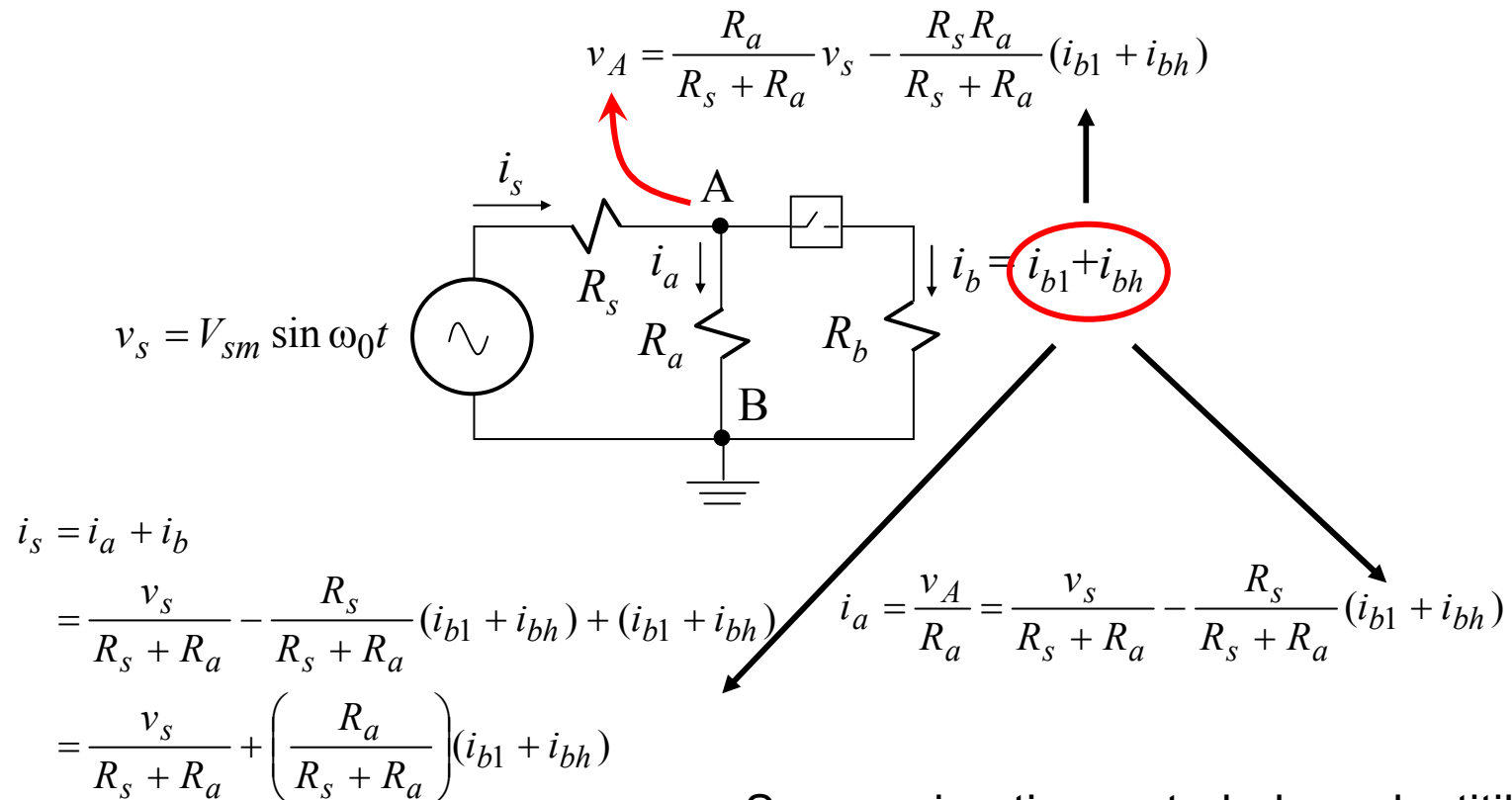


# Perambatan Harmonisa

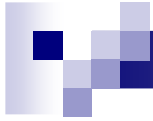


# Pembebanan Non-Linier, Perambatan Harmonisa

## Perambatan Harmonisa



Semua piranti yang terhubung ke titik A, yaitu titik bersama, terpengaruh oleh adanya beban non-linier



# **Ukuran Distorsi Harmonisa**

# Pembebanan Non-Linier, Ukuran Distorsi Harmonisa

## *Ukuran Distorsi Harmonisa*

**Crest Factor**      *crest factor* =  $\frac{\text{nilai puncak}}{\text{nilai efektif}}$

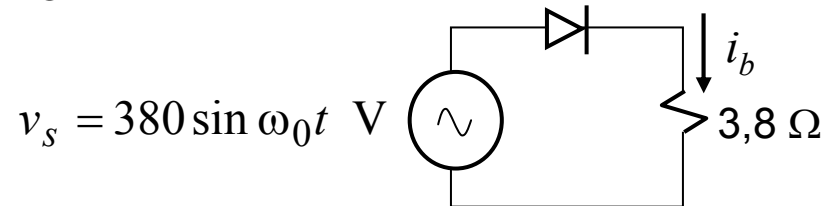
## **Total Harmonic Distortion (THD)**

Untuk tegangan       $THD_V = \frac{V_{hrms}}{V_{1rms}}$

Untuk arus       $THD_I = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}}$

# Pembebanan Non-Linear, Ukuran Distorsi Harmonisa

## CONTOH-2.3.



$$I_{maks} = \frac{380}{3,8} = 100 \text{ A} \Rightarrow i(t) = \left( \begin{array}{l} 31,8 + 50 \cos(\omega_0 t - 1,57) + 21,2 \cos(2\omega_0 t) \\ + 4,2 \cos(4\omega_0 t) + 1,8 \cos(6\omega_0 t) \end{array} \right) \text{ A}$$

$$I_{b1rms} = \frac{50}{\sqrt{2}} \text{ A};$$

$$I_{bhrms} = \sqrt{31,8^2 + \frac{21,2^2}{2} + \frac{4,2^2}{2} + \frac{1,8^2}{2}} = 35,31 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{50^2 / 2 + 35,31^2} = 49,7 \text{ A}$$

$$\text{Crest factor } c.f. = \frac{100}{49,2} = 2$$

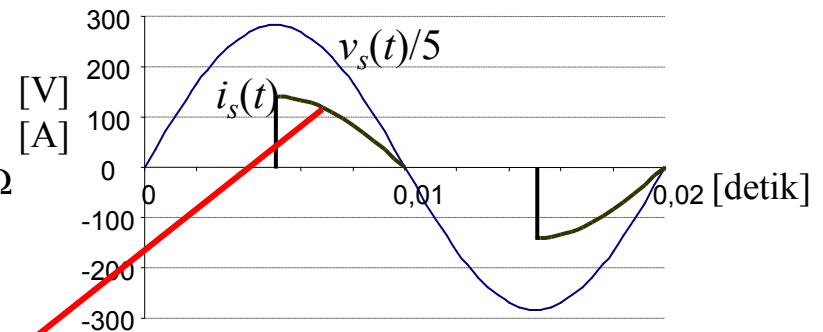
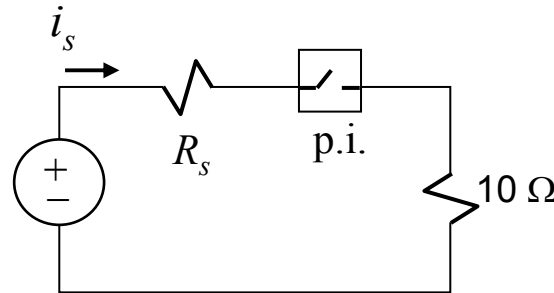
$$\text{THD}_I = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}} = \frac{35,31}{50 / \sqrt{2}} \approx 1 \text{ atau } 100\%$$

**Crest factor dan THD tergantung bentuk dan tidak tergantung dari nilai arus**

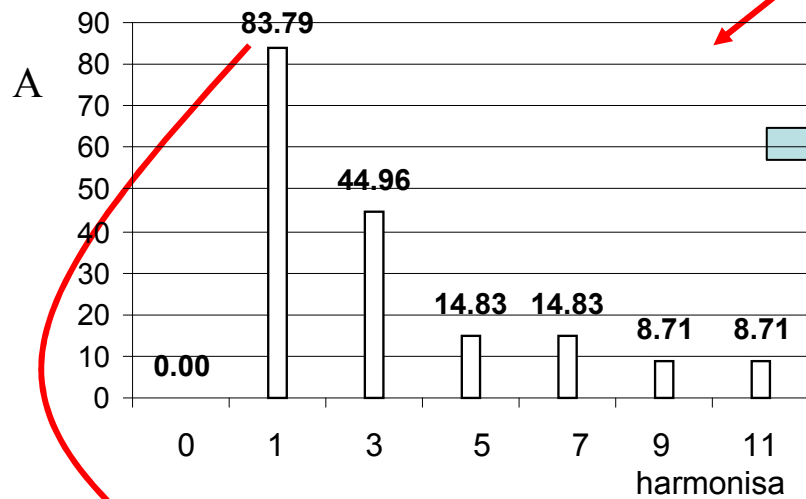
# Pembebanan Non-Linier, Ukuran Distorsi Harmonisa

## CONTOH-2.4.

$$v = 1000\sqrt{2} \sin \omega_0 t \text{ V}$$



Pendekatan numerik spektrum amplitudo sampai harmonisa ke-11:



$$I_{brms} = \sqrt{0 + \frac{83,79^2}{2} + \frac{44,96^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{8,71^2}{2} + \frac{8,71^2}{2}} = 69,4 \text{ A}$$

Nilai puncak arus terjadi pada  $t = 0,005$  detik;  
 $i_{bm} = 141,4 \text{ A}$

$$c.f. = \frac{I_{bm}}{I_{brms}} = \frac{141,4}{69,4} = 2$$

$$I_{1rms} = \frac{83,79}{\sqrt{2}} = 59,25 \text{ A}$$

$$I_{hrms} = \sqrt{0 + \frac{44,96^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{8,71^2}{2} + \frac{8,71^2}{2}} = 36,14 \text{ A}$$

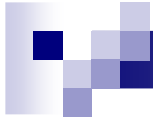
$$THD_I = \frac{36,14}{59,25} \approx 0,6 \text{ atau } 60\%$$



---

## BAB 3

# Tinjauan di Kawasan Fazor



# Fasor dan Impedansi

# Fasor dan Impedansi

Fasor digunakan untuk menyatakan sinyal sinus. Dengan fasor, dapat dihindari operasi diferensial dan integral dalam analisis rangkaian listrik yang mengandung elemen-elemen dinamis. Fasor diturunkan dengan anggapan bahwa seluruh bagian rangkaian memiliki frekuensi sama

Sinyal non-sinus terbangun dari sinyal-sinyal sinus dengan berbagai frekuensi. Oleh karena itu satu sinyal non-sinus tidak dapat diwakili oleh hanya satu fasor

Setiap komponen harmonisa memiliki fasor sendiri, berbeda amplitudo dan sudut fasa dari komponen harmonisa lainnya karena mereka berbeda frekuensi

$$i_n(t) = a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t$$

$$\text{Fasor: } \mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle -\theta_n \quad \theta = \tan^{-1} \frac{|b_n|}{|a_n|}$$



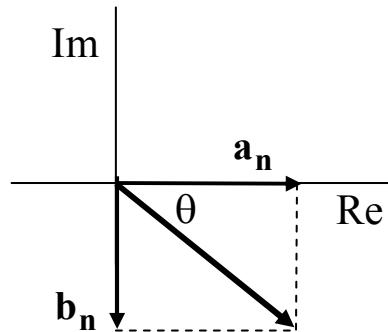
# Fasor dan Impedansi

## Koefisien *FOURIER* dan diagram fasor

$$i_n(t) = a_n \cos n\omega t + b_n \sin \omega t$$

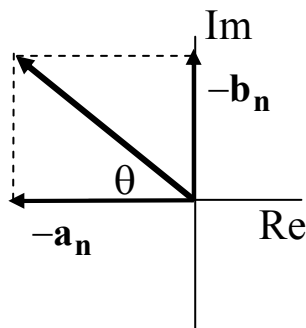
$$\mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle -\theta_n$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{|b_n|}{|a_n|}$$



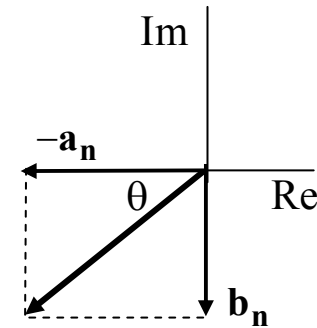
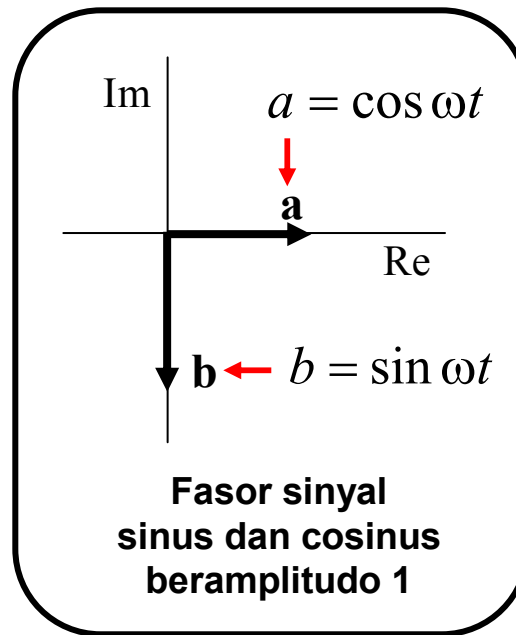
$$a_n > 0 \text{ dan } b_n > 0$$

$$\mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle -\theta$$



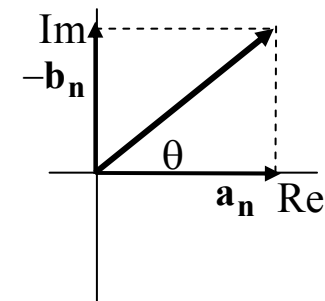
$$a_n < 0 \text{ dan } b_n < 0$$

$$\mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle (180^\circ + \theta)$$



$$a_n < 0 \text{ dan } b_n > 0$$

$$\mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle (180^\circ - \theta)$$



$$a_n > 0 \text{ dan } b_n < 0$$

$$\mathbf{I}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle \theta$$

# Fasor dan Impedansi

## CONTOH-3.1.

$$i(t) = I_m \times \left( \begin{array}{l} 0,318 + 0,5 \cos(\omega_0 t - 1,57) + 0,212 \cos(2\omega_0 t) \\ + 0,042 \cos(4\omega_0 t) + 0,018 \cos(6\omega_0 t) \\ + 0,010 \cos(8\omega_0 t) + 0,007 \cos(10\omega_0 t) \end{array} \right) \text{A}$$

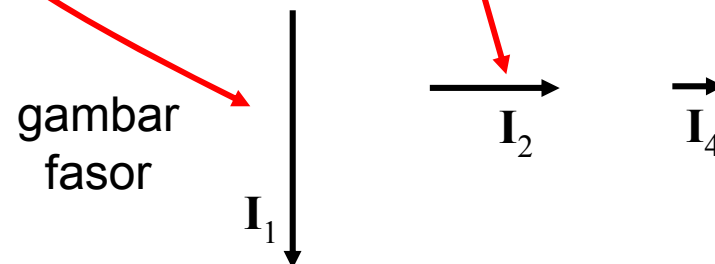
$$I_0 = 0,318 I_m;$$

$$I_1 = \frac{0,5 I_m}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ;$$

$$I_2 = \frac{0,212 I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ;$$

$$I_4 = \frac{0,042 I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ; \quad I_6 = \frac{0,018 I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ; \quad I_8 = \frac{0,010 I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ;$$

$$I_{10} = \frac{0,007 I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ;$$



# Fasor dan Impedansi

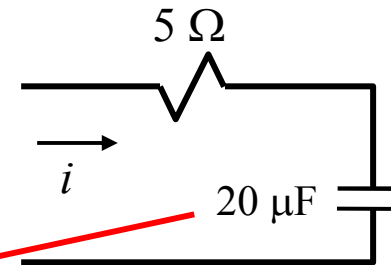
## Impedansi

Karena setiap komponen harmonisa memiliki frekuensi berbeda maka pada satu cabang rangkaian yang mengandung elemen dinamis akan terjadi impedansi yang berbeda untuk setiap komponen

### CONTOH-3.2.

$$i = 200 \sin \omega_0 t + 70 \sin 3\omega_0 t + 30 \sin 5\omega_0 t$$

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



Untuk komponen fundamental

$$X_{C1} = 1 / (2\pi \times 50 \times 20 \times 10^{-6}) = 159,15 \rightarrow Z_1 = \sqrt{5^2 + 159,15^2} = 159,23 \Omega$$

$$\text{Tegangan puncak } V_{1m} = |Z_1| \times I_{1m} = 159,23 \times 200 \approx 31,85 \text{ kV}$$

Untuk harmonisa ke-3

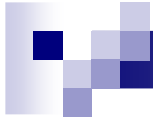
$$X_{C3} = X_{C1} / 3 = 53,05 \rightarrow Z_3 = \sqrt{5^2 + 53,05^2} = 53,29 \Omega$$

$$\text{Tegangan puncak } V_{3m} = |Z_3| \times I_{3m} = 53,29 \times 70 = 3,73 \text{ kV}$$

Untuk harmonisa ke-5

$$X_{C5} = X_{C1} / 5 = 31,83 \rightarrow Z_5 = \sqrt{5^2 + 31,83^2} = 32,22 \Omega$$

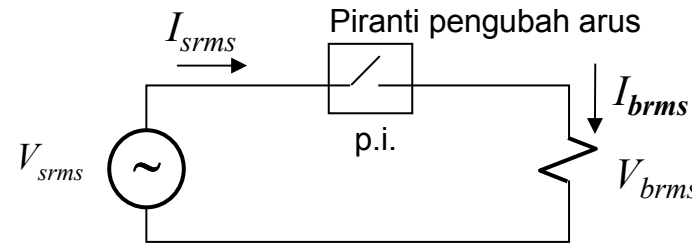
$$\text{Tegangan puncak } V_{5m} = |Z_5| \times I_{5m} = 32,22 \times 30 = 0,97 \text{ kV}$$



# Daya dan Faktor Daya

# Daya dan Faktor Daya

## Daya Kompleks



**Sisi Beban**  $|S_b| = V_{brms} \times I_{brms} \text{ VA}$

Definisi  $S = VI^*$  adalah untuk sinyal sinus murni. Untuk sinyal nonsinus kita tidak menggambarkan fasor arus harmonisa total sehingga mengenai daya kompleks hanya bisa dinyatakan besarnya, tetapi segitiga daya tidak dapat digambarkan

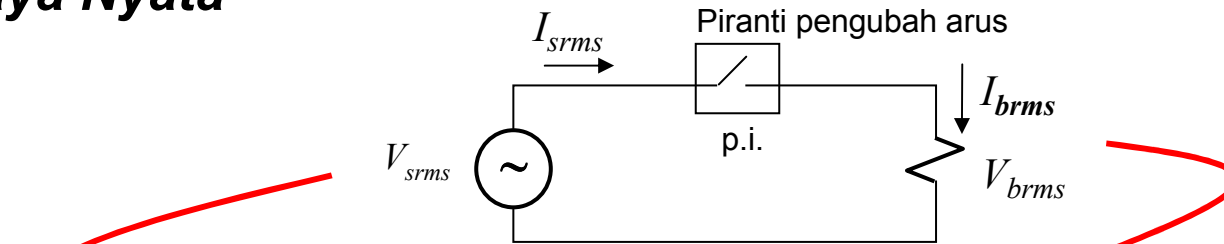
**Sisi Sumber**  $|S_s| = V_{srms} \times I_{srms} = \frac{V_{sm}}{\sqrt{2}} \times I_{srms} \text{ VA}$

$$I_{srms} = \sqrt{I_{s1rms}^2 + I_{shrms}^2} \text{ A}$$

Tegangan sumber sinusoidal

# Daya dan Faktor Daya

## Daya Nyata



**Sisi Beban**  $P_b = I_{brms}^2 R_b = (I_{b1rms}^2 + I_{bhrms}^2) R_b \text{ W}$

↑  
arus efektif fundamental

↑  
arus efektif harmonisa total

**Sisi Sumber**  $P_{s1} = V_{srms} I_{1rms} \cos\phi_1 \text{ W}$

↑  
beda sudut fasa antara tegangan dan arus fundamental sumber

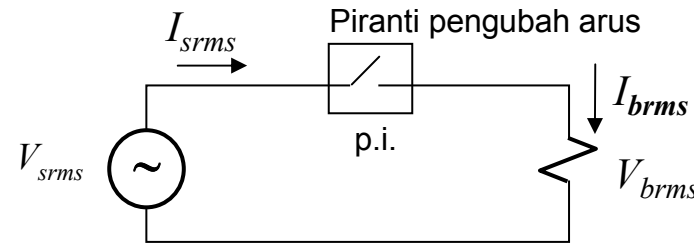
$\cos\phi_1$  adalah faktor daya pada komponen fundamental yang disebut **displacement power factor**

Daya nyata dikirimkan melalui komponen fundamental

Komponen arus harmonisa sumber tidak memberikan transfer energi netto

# Daya dan Faktor Daya

## Faktor Daya



**Sisi Beban**  $f.d. \text{ beban} = \frac{P_b}{|S_b|}$  (f.d. total di beban)  
rasio antara daya nyata dan daya kompleks yang diserap beban

**Sisi Sumber**  $f.d._s = \frac{P_{s1}}{|S_s|}$  (f.d. total dilihat sumber)

$f.d._{s1} = \frac{P_{s1}}{|S_{s1}|}$  (f.d. komponen fundamental)

**Impedansi Beban**  $|Z_b| = \frac{V_{brms}}{I_{brms}} \Omega$

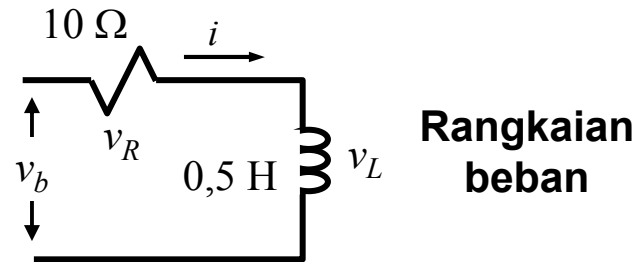
Impedansi beban adalah rasio antara tegangan efektif dan arus efektif beban

# Daya dan Faktor Daya

## CONTOH-3.3.

$$v_b = 100 + 200\sqrt{2} \sin \omega_0 t \text{ V}$$

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



Tegangan pada beban terdiri dari dua komponen yaitu komponen searah dan komponen fundamental

$$V_0 = 100 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad I_{b0} = V_0 / R_b = 100 / 10 = 10 \text{ A}$$

$$V_1 = 200 \angle -90^\circ \quad \Rightarrow \quad I_{b1rms} = \frac{V_{1rms}}{|Z_b|} = \frac{200}{\sqrt{10^2 + (100\pi \times 0,05)^2}} = 10,74 \text{ A}$$

$$I_{brms} = \sqrt{I_{b0}^2 + I_{b1rms}^2} = \sqrt{10^2 + 10,74^2} = 14,68 \text{ A}$$

$$\Rightarrow P_{Rb} = I_{brms}^2 R_b = 14,68^2 \times 10 = 2154 \text{ W}$$

$$V_{brms} = \sqrt{V_0^2 + V_{1rms}^2} = \sqrt{100^2 + 200^2} = 100\sqrt{5} \text{ V} \quad \Rightarrow \quad |Z_{beban}| = \frac{V_{brms}}{I_{brms}} = \frac{100\sqrt{5}}{14,68} = 15,24 \Omega$$

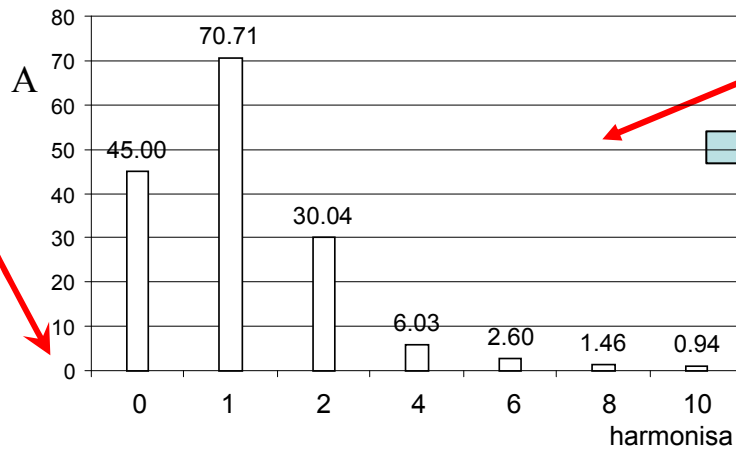
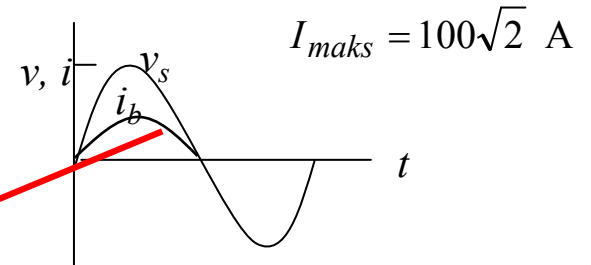
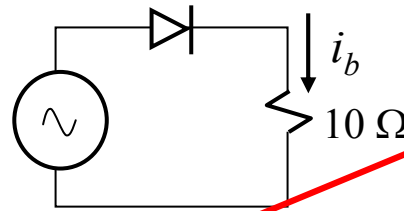
$$|S_b| = V_{brms} \times I_{brms} = 100\sqrt{5} \times 14,68 = 3281 \text{ VA} \quad \Rightarrow \quad \text{f.d.}_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{2154}{3281} = 0,656$$



# Daya dan Faktor Daya

## CONTOH-3.4.

$$v_s = 1000\sqrt{2}\sin\omega t \text{ V}$$



$$I_0 = 45; I_{1rms} = \frac{70.71}{\sqrt{2}} = 50; I_{2rms} = \frac{30.04}{\sqrt{2}} = 21,2; \text{ dst}$$

$$I_{4rms} = 4,3; I_{6rms} = 1,8; I_{8rms} = 1; I_{10rms} = 0.7$$

$$I_{hrms} = \sqrt{2 \times 31,8^2 + 21,2^2 + 4,3^2 + 1,8^2 + 1^2 + 0,7^2} = 50 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{shrms}^2} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 70,7 \text{ A}$$

$$|S_s| = V_{srms} \times I_{rms} = 1000 \times 70,7 = 70,7 \text{ kVA}$$

### Teorema Tellegen:

$$P_s = P_b = I_{rms}^2 R_b = 70,7^2 \times 10 = 50 \text{ kW}$$

$$f.d._s = P_s / |S_s| = P_b / |S_s| = 50 / 70,7 = 0,7$$

### Komponen fundamental sisi sumber:

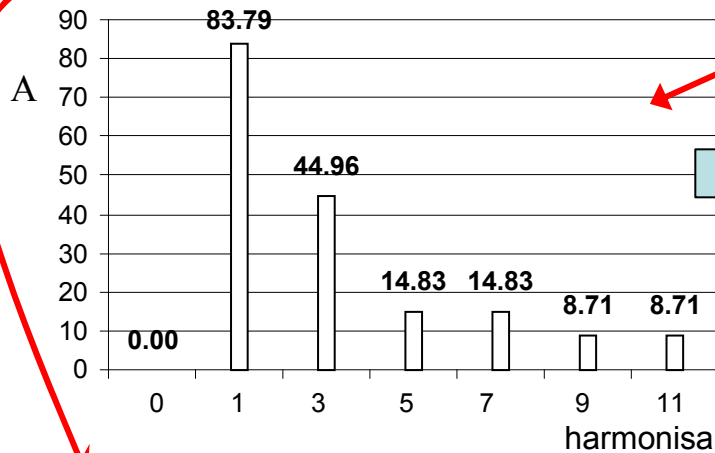
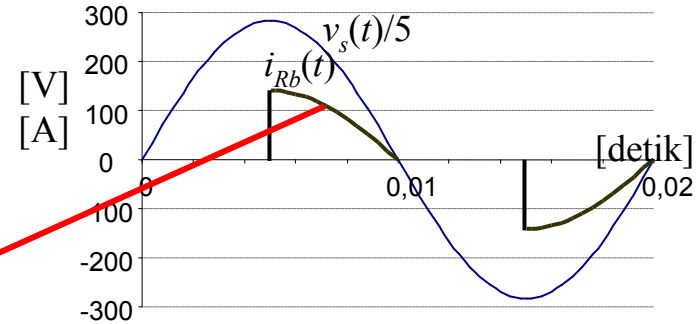
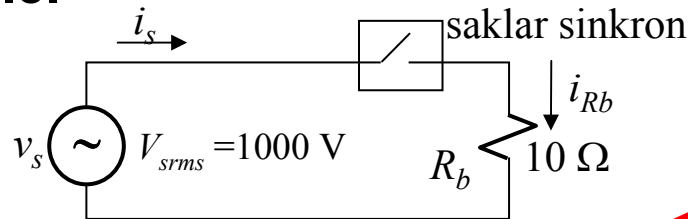
$$P_s = V_{srms} I_{1rms} \cos \varphi_1$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_s}{V_{srms} I_{1rms}} = \frac{50000}{1000 \times 50} = 1$$

$$THD_I = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}} = \frac{50}{50} = 1 \text{ atau } 100\%$$

# Daya dan Faktor Daya

## CONTOH-3.5.



$$I_{1rms} = \frac{83,79}{\sqrt{2}} = 59,25 \text{ A}$$

$$I_{hrms} = \sqrt{0 + \frac{44,96^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{14,83^2}{2} + \frac{8,71^2}{2} + \frac{8,71^2}{2}}$$

$$= 36,14 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{59,25^2 + 36,14^2} = 69,4 \text{ A}$$

$$|S_s| = V_{srms} I_{rms} = 1000 \times 69,4 = 69,4 \text{ kVA}$$

### Teorema Tellegen:

$$P_s = P_b = I_{rms}^2 R_b = 69,4^2 \times 10 = 48,17 \text{ kW}$$

$$f.d._s = P_s / |S_s| = 48,17 / 69,4 = 0,69$$

### Komponen fundamental sisi sumber:

$$P_s = V_{srms} I_{1rms} \cos \varphi_1$$

$$f.d._{s1} = \cos \varphi_1 = \frac{P_s}{V_{srms} I_{1rms}} = \frac{48170}{1000 \times 59,25} = 0,813$$

$$THD_I = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}} = \frac{36,14}{59,25} = 0,61 \text{ atau } 61\%$$

# Daya dan Faktor Daya

## Koreksi pada CONTOH-3.5.

Perhitungan pada Contoh-3.5 dilakukan dengan mengandalkan spektrum amplitudo yang hanya sampai harmonisa ke-11 di mana nilainya masih 10% dari fundamental. Hal ini sangat berbeda dengan Contoh-3.4 di mana harmonisa ke-10 sudah tinggal 1% dari komponen fundamental

Koreksi dilakukan dengan melihat persamaan arus fundamental dalam uraian deret Fourier

$$i_1(t) = I_m (-0.5 \cos(\omega_0 t) + 0.7 \sin(\omega_0 t))$$

$$\theta = \tan^{-1}(0.7/0.5) = 57,6^\circ$$

$$\phi_1 = 32,4^\circ$$

$$f.d._{s1} = \cos \phi_1 = \cos(32,4^\circ) = 0,844$$

$$P_s = V_{srms} I_{1rms} \cos \phi_1$$

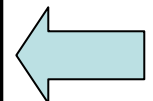
$$= 1000 \times 59,4 \times 0.844 = 50 \text{ kW}$$

Ini harus sama dengan yang diterima  $R_b$

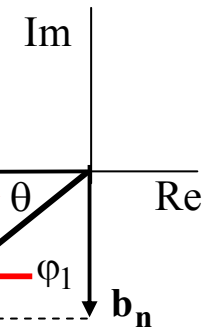
$$|S_s| = V_{srms} I_{rms} = 1000 \times 70,7 = 70,7 \text{ kVA}$$

$$f.d._s = P_s / |S_s| = 50 / 70,7 = 0,7$$

$$THD_I = \frac{38,63}{59,25} = 0,65 \text{ atau } 65\%$$



koreksi



$$a_n < 0 \text{ dan } b_n > 0$$

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \angle (180^\circ - \theta)$$

$$P_b = I_{rms}^2 R_b = P_s$$

$$I_{rms} = \sqrt{P_s / R_b} = \sqrt{50000 / 10} = 70,7 \text{ A}$$

# Daya dan Faktor Daya

## Transfer Daya

Daya nyata diserap beban:

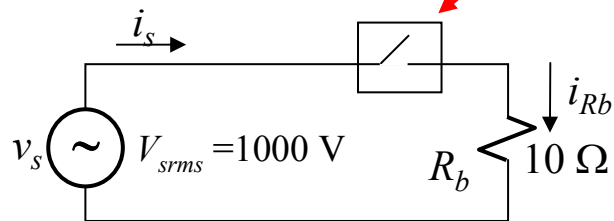
$$P_{Rb} = (I_{b1rms}^2 + I_{bhrms}^2)R_b = I_{b1rms}^2 R_b + I_{bhrms}^2 R_b$$

Daya nyata yang diserap beban *melalui komponen fundamental* selalu lebih kecil dari daya nyata yang dikirim oleh sumber yang hanya melalui arus fundamental

Beban menerima daya nyata juga melalui komponen harmonisa

Padahal dilihat dari sisi sumber komponen harmonisa tidak memberikan transfer daya nyata

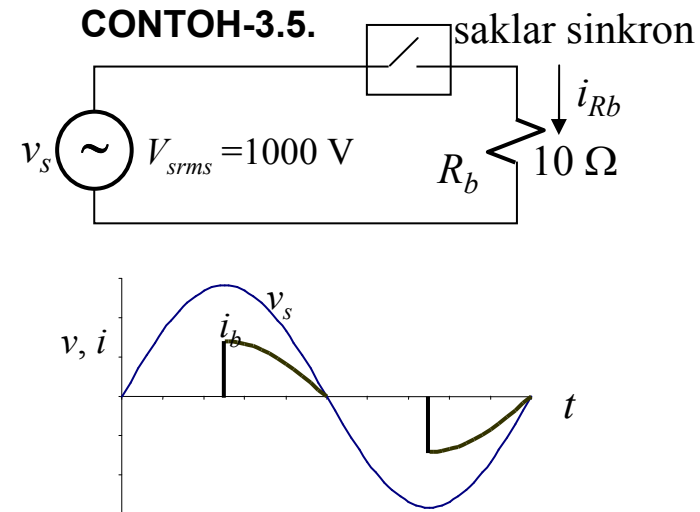
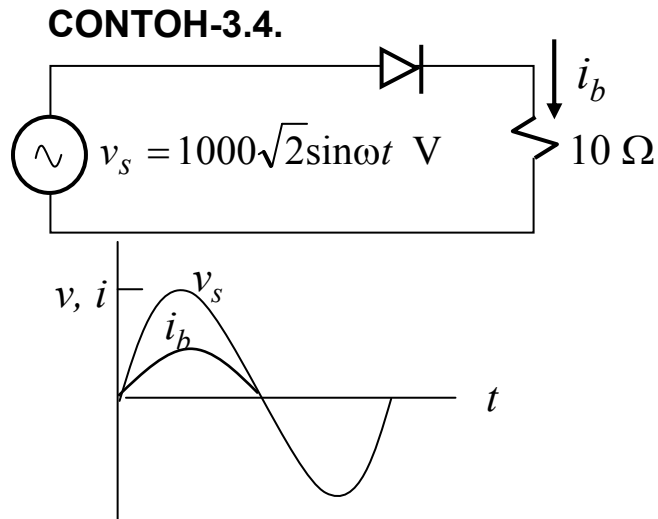
Penafsiran:



Piranti ini menerima daya nyata dari sumber, meneruskan sebagian langsung ke beban dan mengubah sebagian menjadi komponen harmonisa baru diteruskan ke beban  
Dalam mengubah sebagian daya nyata menjadi komponen harmonisa terjadi daya reaktif yang dikembalikan ke sumber

# Daya dan Faktor Daya

## Perbandingan penyearah setengah gelombang dan saklar sinkron



**Setelah dikoreksi**

$$|S_s| = V_{srms} \times I_{rms} = 1000 \times 70,7 = 70,7 \text{ kVA} \quad \longleftrightarrow$$

$$|S_s| = V_{srms} I_{rms} = 1000 \times 70,7 = 70,7 \text{ kVA}$$

$$P_s = P_b = I_{rms}^2 R_b = 70,67^2 \times 10 = 50 \text{ kW} \quad \longleftrightarrow$$

$$P_s = V_{srms} I_{1rms} \cos \varphi_1 = 1000 \times 59,4 \times 0,844 = 50 \text{ kW}$$

$$f.d._s = P_s / |S_s| = P_b / |S_s| = 50 / 70,7 = 0,7 \quad \longleftrightarrow$$

$$f.d._s = P_s / |S_s| = 50 / 70,7 = 0,7$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_s}{V_{srms} I_{1rms}} = \frac{50000}{1000 \times 59,4} = 1$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(32,4^\circ) = 0,844$$

$$THD_I = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}} = \frac{50}{50} = 1 \text{ atau } 100\%$$

$$THD_I = \frac{38,63}{59,25} = 0,65 \text{ atau } 65\%$$

# Daya dan Faktor Daya

## ***Kompensasi Daya Reaktif***

### **Penyearah setengah gelombang**

Arus fundamental sudah sefasa dengan tegangan sumber,  
 $\cos\phi_1=1$ ,  
perbaikan faktor daya tidak terjadi dengan cara kompensasi daya reaktif

Padahal faktor daya total masih lebih kecil dari satu  
 $f.d.sumber = 0,7$

Daya reaktif yang masih ada merupakan akibat dari arus harmonisa. Oleh karena itu upaya yang harus dilakukan adalah menekan arus harmonisa melalui *penapisan*.

### **saklar sinkron**

Arus fundamental *lagging* terhadap tegangan fundamental,  
 $\cos\phi_1=0.844$ ,  
perbaikan faktor daya masih mungkin dilakukan melalui kompensasi daya reaktif

Faktor daya total lebih kecil dari satu  
 $f.d.sumber = 0,7$

Dengan menambah kapasitor paralel  
 $C = 100 \mu\text{F}$   
faktor daya total akan menjadi  
 $f.d.sumber = 0,8$

Penjelasan lebih rinci ada dalam buku.



---

## BAB 4

# Dampak Harmonisa

# Dampak Harmonisa

## ***Dampak Pada Sistem***

Adanya harmonisa menyebabkan terjadinya peningkatan *susut energi* yaitu energi “hilang” yang tak dapat dimanfaatkan, yang secara alamiah berubah menjadi panas

Harmonisa juga menyebabkan terjadinya peningkatan temperatur pada konduktor kabel, pada kapasitor, induktor, dan transformator, yang memaksa dilakukannya *derating* pada alat-alat ini dan justru *derating* ini membawa kerugian (finansial) yang lebih besar dibandingkan dengan dampak langsung yang berupa susut energi

Pembebanan nonlinier tidaklah selalu kontinyu, melainkan fluktuatif. Oleh karena itu pada selang waktu tertentu piranti terpaksa bekerja pada batas tertinggi temperatur kerjanya bahkan mungkin terlampaui pada saat-saat tertentu. Hal ini akan mengurangi umur ekonomis piranti.

Harmonisa dapat menyebabkan kenaikan tegangan yang dapat menimbulkan *micro-discharges* bahkan *partial-discharges* dalam piranti yang memperpendek umur, bahkan *mal-function* bisa terjadi pada piranti.

Harmonisa juga menyebabkan *overload* pada penghantar netral; kWh-meter memberi penunjukan tidak normal; rele proteksi juga akan terganggu, bisa tidak mendeteksi besaran rms bahkan mungkin gagal *trip*.



# Dampak Harmonisa

## ***Dampak Pada Instalasi di Luar Sistem***

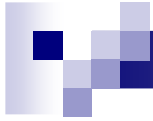
Harmonisa menimbulkan *noise pada* instalasi telepon dan komunikasi kabel.

*Digital clock* akan bekerja secara tidak normal.

## ***Dampak Tidak Langsung***

Selain dampak pada sistem dan instalasi di luar sistem yang merupakan dampak teknis, terdapat dampak tidak langsung yaitu dampak ekonomi.

***Dalam kuliah ini hanya akan dibahas  
Dampak Pada Sistem***



# Dampak Pada Konduktor

# Dampak Harmonisa, Konduktor

## Konduktor

Temperatur konduktor tanpa arus sama dengan temperatur sekitar,  $T_s$

Konduktor dialiri arus mengalami **kenaikan temperatur** sebesar  $\Delta T$

Temperatur konduktor di aliri arus adalah  $T_s + \Delta T$

$$= c_p \times I^2 R$$

Kapasitas panas pada tekanan konstan  $\uparrow$   $\Rightarrow$  sebanding  $I^2 R$

Konduktor dialiri arus non-sinus:

$$P_s = I_{rms}^2 R_s = (I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2) R_s = I_{1rms}^2 R_s (1 + THD_I^2)$$

Daya diserap konduktor  $\uparrow$  Resistansi konduktor  $\uparrow$  Menyebabkan kenaikan temperatur / susut energi  $\downarrow$

# Dampak Harmonisa, Konduktor

## CONTOH-4.1.

Kabel: resistansi total  $80 \text{ m}\Omega$ , mengalirkan arus  $100 \text{ A}$  frekuensi  $50 \text{ Hz}$ , temperatur  $70^\circ \text{ C}$ , pada suhu sekitar  $25^\circ \text{ C}$ .

Perubahan beban menyebabkan munculnya harmonisa  $350 \text{ Hz}$  dengan nilai efektif  $40 \text{ A}$

Susut daya semula (tanpa harmonisa):  $P_1 = 100^2 \times 0,08 = 800 \text{ W}$

Susut daya tambahan karena arus harmonisa:  $P_7 = 40^2 \times 0,08 = 128 \text{ W}$

Susut daya berubah menjadi:  $P_{kabel} = 800 + 128 = 928 \text{ W}$

Terjadi tambahan susut daya sebesar  $16\%$

Kenaikan temperatur semula:  $70^\circ - 25^\circ = 45^\circ \text{ C}$

Pertambahan kenaikan temperatur:  $\Delta T = 0,16 \times 45^\circ = 7,2^\circ \text{ C}$

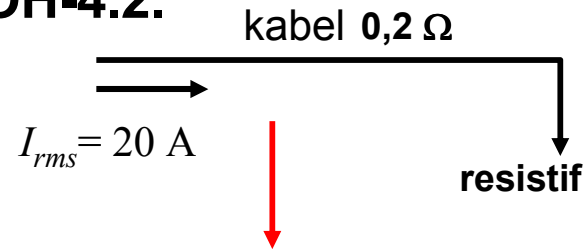
⇒ Kenaikan temperatur akibat adanya harmonisa:  $T = 45^\circ \text{ C} + 7,2^\circ \text{ C} \approx 52^\circ \text{ C}$

Temperatur kerja akibat adanya harmonisa:  $T' = 25^\circ + 52^\circ = 77^\circ \text{ C}$

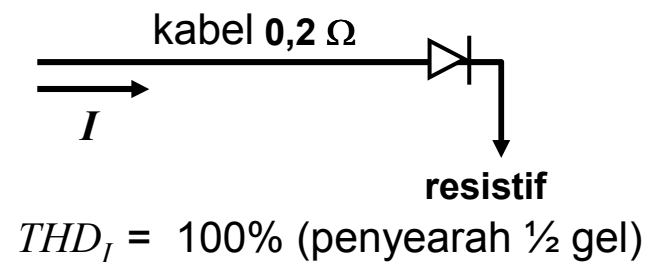
Temperatur kerja naik  $10\%$

# Dampak Harmonisa, Konduktor

## CONTOH-4.2.



$$P_{kabel} = 20^2 \times 0,2 = 80 \text{ W}$$



➤ Jika daya tersalur ke beban dipertahankan:

$$I = I_{1rms} = 20 \text{ A} \Rightarrow P'_{kabel} = 20^2 \times 0,2(1+1^2) = 160 \text{ W}$$

Susut naik 100%

➤ Jika susut daya di kabel tidak boleh meningkat:

$$I = I_{rms} = 20 \text{ A} \Rightarrow P_k = 20^2 \times 0,2 = 80 \text{ W}$$

Susut tetap

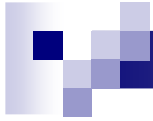
$$I_{rms}^2 = I_{1ms}^2 + I_{hms}^2 = I_{1ms}^2 (1 + THD^2) = 2 \times I_{1rms}^2$$

$$\Rightarrow I_{1rms} = 20/\sqrt{2}$$

Arus fundamental turun menjadi 70%

➔ Daya tersalur ke beban harus diturunkan menjadi 70%

**derating kabel**

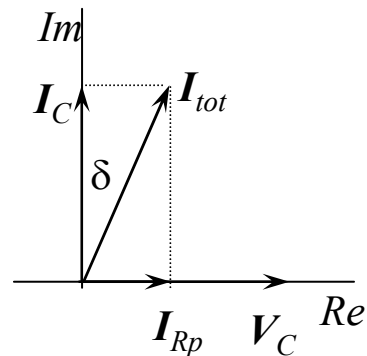


# Dampak pada Kapasitor

# Dampak Harmonisa, Kapasitor

## Kapasitor

Diagram Fasor Kapasitor



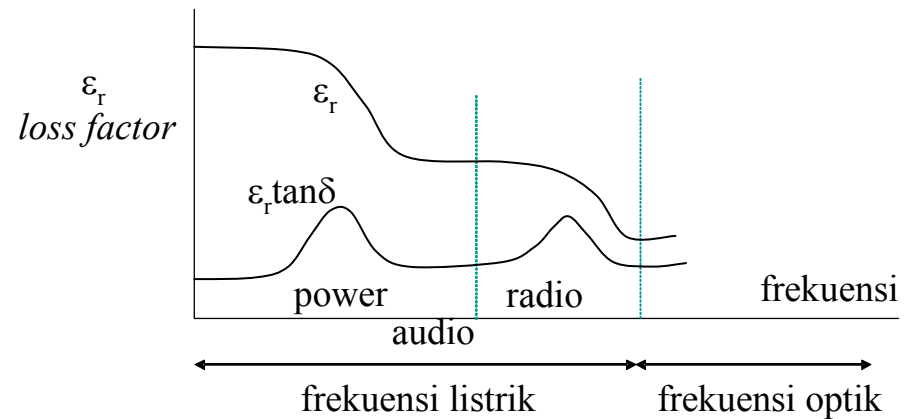
$$P = |\mathbf{V}_C| |\mathbf{I}_{Rp}| = V_{Crms} I_{Crms} \tan \delta$$

↑ faktor desipasi  
(loss tangent)

$$P = (\epsilon_r V_0)(\omega C V_0) \tan \delta = 2\pi f V_0^2 C \epsilon_r \tan \delta$$

↑ faktor kerugian  
(loss factor)

Pengaruh Frekuensi Pada  $\epsilon_r$



$$|X_C| = \frac{1}{2\pi f C} \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

$\epsilon_r$  menurun dengan naiknya frekuensi

C menurun dengan naiknya frekuensi.

Namun perubahan frekuensi lebih dominan dalam menentukan reaktansi dibanding dengan penurunan  $\epsilon_r$ ; oleh karena itu dalam analisis kita menganggap kapasitansi konstan.

# Dampak Harmonisa, Kapasitor

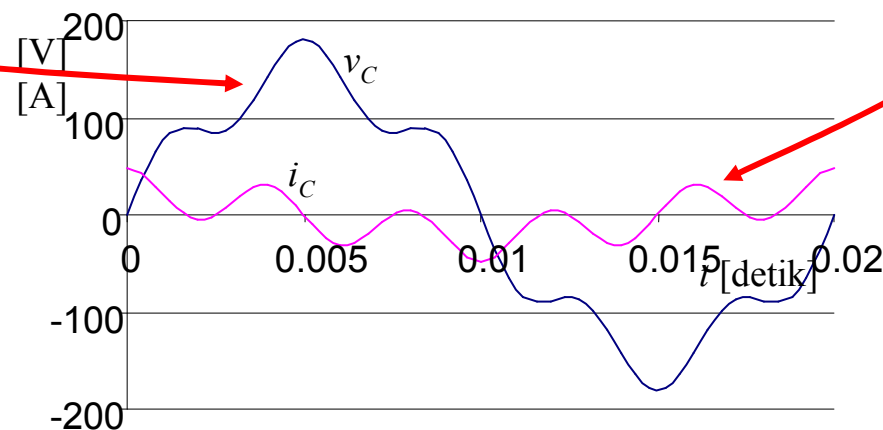
## CONTOH-4.3.

$$v = 150 \sin \omega t + 30 \sin 5\omega t \text{ V}$$
$$f = 50 \text{ Hz}$$



$$v_C = 150 \sin 100\pi t + 30 \sin 300\pi t$$

$$i_C = 150 \times 500 \times 10^{-6} \times 100\pi \cos 100\pi t + 30 \times 500 \times 10^{-6} \times 500\pi \cos 500\pi t$$



Kurva tegangan dan kurva arus kapasitor berbeda bentuk pada tegangan non-sinus

Peran tegangan dan peran arus pada kapasitor perlu ditinjau secara terpisah



# Dampak Harmonisa, Kapasitor

## CONTOH-4.4.

$$v = 150 \sin \omega t + 30 \sin 3\omega t + 30 \sin 5\omega t \text{ V}$$

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



Rating  
110 V rms, 50 Hz  
losses dielektrik 0,6 W

$$V_{1rms} = \frac{150}{\sqrt{2}} \text{ V}$$

$$V_{3rms} = \frac{30}{\sqrt{2}} \text{ V}$$

$$V_{5rms} = \frac{5}{\sqrt{2}} \text{ V}$$

$$THD_V = \frac{V_{hrms}}{V_{1rms}} = \frac{\sqrt{\frac{30^2}{2} + \frac{5^2}{2}}}{150/\sqrt{2}} = \frac{21,5}{106} = 0,20 \text{ atau } 20\%$$

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 500 \times 10^{-6}} = 6,37 \ \Omega \rightarrow I_{C1rms} = \frac{150/\sqrt{2}}{6,37} = 16,7 \ \text{A}$$

$$X_{C3} = \frac{X_{C1}}{3} = 2,12 \ \Omega \rightarrow I_{C3rms} = \frac{30/\sqrt{2}}{2,12} = 10 \ \text{A}$$

$$X_{C5} = \frac{X_{C1}}{5} = 1,27 \ \Omega \rightarrow I_{C5rms} = \frac{5/\sqrt{2}}{1,27} = 2,8 \ \text{A}$$

$$THD_I = \frac{I_{hrms}}{I_{C1rms}} = \frac{\sqrt{10^2 + 2,8^2}}{16,7} = 0,62 \text{ atau } 62\%$$

Rugi daya dalam dielektrik  $P = 2\pi f V_0^2 C \epsilon_r \tan \delta$



Berbanding lurus dengan frekuensi dan kuadrat tegangan

# Dampak Harmonisa, Kapasitor

$$v = 150 \sin \omega t + 30 \sin 3\omega t + 30 \sin 3\omega t \text{ V}$$
$$f = 50 \text{ Hz}$$



Rating  
110 V rms, 50 Hz  
losses dielektrik 0,6 W

$$P_{50 \text{ Hz}, 110 \text{ V}} = 0,6 \text{ W}$$

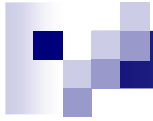
$$P_{150 \text{ Hz}, 30 \text{ V}} = \frac{150}{50} \times \left( \frac{30}{110} \right)^2 \times 0,6 = 0,134 \text{ W}$$

$$P_{250 \text{ Hz}, 5 \text{ V}} = \frac{250}{50} \times \left( \frac{5}{110} \right)^2 \times 0,6 = 0,006 \text{ W}$$

Berbanding lurus dengan  
frekuensi dan kuadrat  
tegangan

Losses dielektrik total:

$$\longrightarrow P_{total} = 0,6 + 0,134 + 0,006 = 0,74 \text{ W}$$

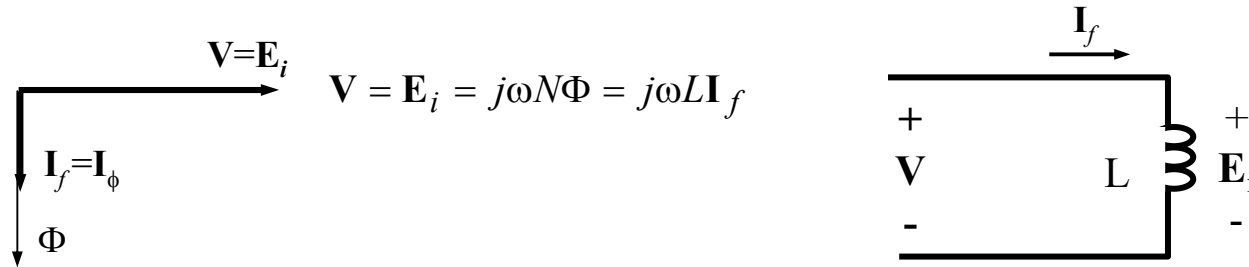


# Dampak pada Induktor

# Dampak Harmonisa, Induktor

## Induktor

### Diagram Fasor Induktor Ideal



**CONTOH-4.5.**  $v = 150 \sin\omega t + 30 \sin 3\omega t + 30 \sin 5\omega t$  V     $V = E_i = 75$  V rms  
 $f = 50$  Hz     $L = ?$

$$\begin{aligned}
 V_{L1rms} &= 4,44 \times 50 \times L \times 50 = 11100 \times L \text{ V} \\
 V_{L3rms} &= 4,44 \times 150 \times L \times 10 = 6660 \times L \text{ V} \\
 V_{L5rms} &= 4,44 \times 250 \times L \times 5 = 5550 \times L \text{ V}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} V_{L1rms} \\ V_{L3rms} \\ V_{L5rms} \end{aligned}} \right\}
 \begin{aligned}
 V_{Lrms} &= L \times \sqrt{11100^2 + 6660^2 + 5550^2} \\
 &= 14084,3 \times L \text{ V} \\
 &= 75 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$L = \frac{75}{14084,3} = 0,0053 \text{ H}$$

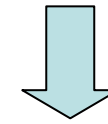
$\uparrow$   
 $= \frac{2\pi f}{\sqrt{2}}$

# Dampak Harmonisa, Induktor

## Fluksi Dalam Inti

$$\phi_m = \frac{V_{rms}}{4,44 \times f \times N}$$

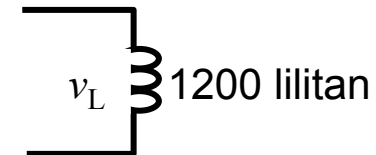
nilai puncak fluksi  $\uparrow$   $\phi_m$   $\leftarrow$  nilai efektif tegangan sinus  $V_{rms}$   
 $\uparrow$  jumlah lilitan  $N$



Bagaimana jika non-sinus?

### CONTOH-4.6.

$$v_L = 150\sqrt{2} \sin \omega_0 t + 50\sqrt{2} \sin(5\omega_0 t - 135^\circ)$$



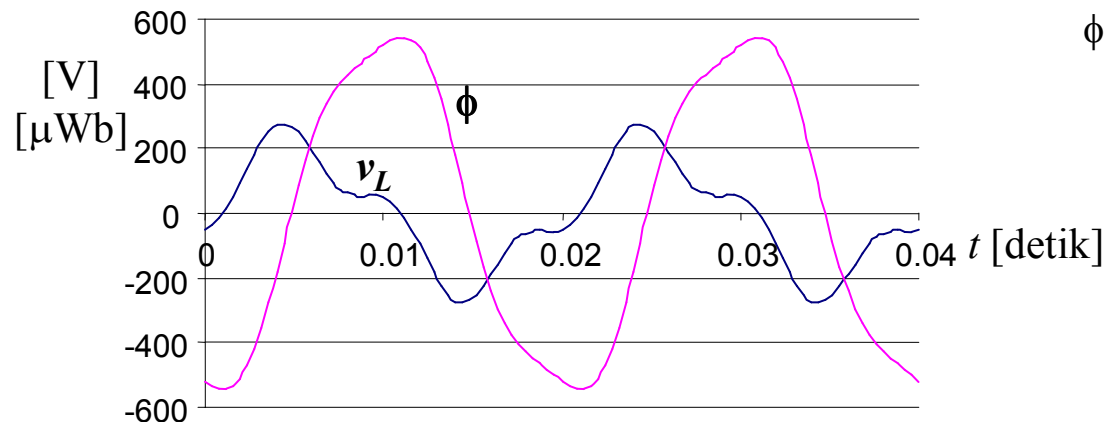
$$\phi_{1m} = \frac{150}{4,44 \times 50 \times 1200} = 563 \mu\text{Wb}$$

$$\longrightarrow \phi_1 = 563 \sin(\omega_0 t - 90^\circ) \mu\text{Wb}$$

$$\phi_{3m} = \frac{50}{4,44 \times 3 \times 50 \times 1200} = 62,6 \mu\text{Wb}$$

$$\longrightarrow \begin{aligned} \phi_3 &= 62,6 \sin(3\omega_0 t - 135^\circ - 90^\circ) \\ &= 62,6 \sin(3\omega_0 t - 225^\circ) \mu\text{Wb} \end{aligned}$$

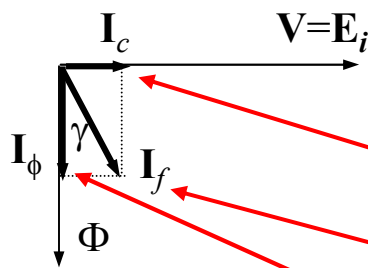
$$\begin{aligned} \phi &= 563 \sin(\omega_0 t - 90^\circ) \\ &+ 62,6 \sin(3\omega_0 t - 225^\circ) \mu\text{Wb} \end{aligned}$$



Bentuk gelombang fluksi berbeda dengan bentuk gelombang tegangan

# Dampak Harmonisa, Induktor

## Rugi-Rugi Inti



Adanya rugi inti menyebabkan fluksi magnetik  $\Phi$  tertinggal dari arus magnetisasi  $I_f$  sebesar  $\gamma$  yang disebut **sudut histerisis**.

Arus untuk mengatasi **rugi inti**

Arus magnetisasi

Arus untuk membangkitkan fluksi

$$P_c = I_c V = V I_f \cos(90^\circ - \gamma)$$

rugi histerisis

rugi arus pusar

$$P_h = w_h v f$$

↑↑↑ frekuensi  
↑ volume  
↑ luas loop kurva histerisis

Formulasi empiris untuk **frekuensi rendah**

$$P_h = v f (K_h B_m^n) \quad P_e = K_e f^2 B_m^2 \tau^2 v$$

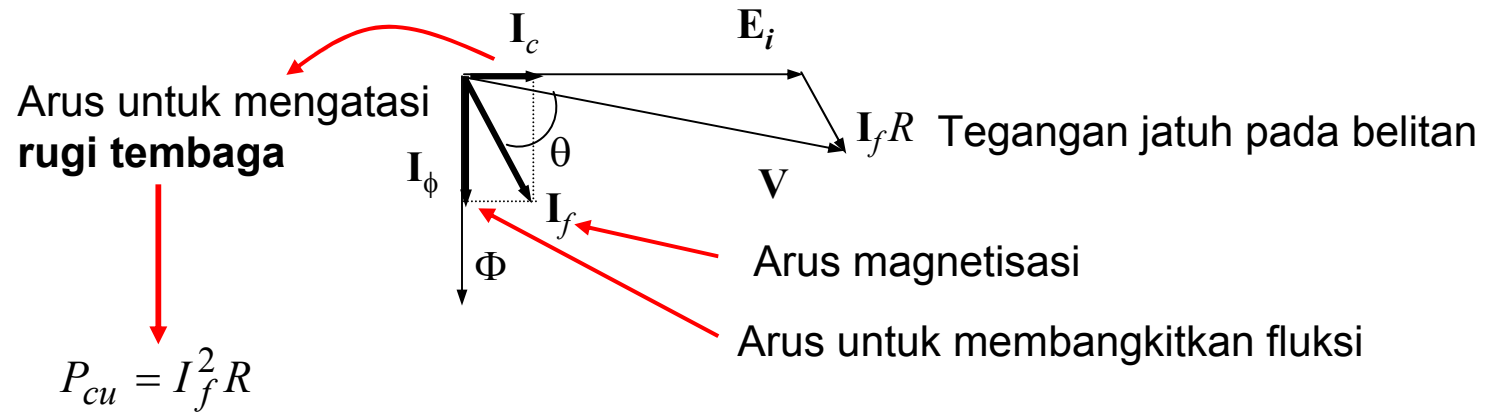
$B_m$  : nilai kerapatan fluksi maksimum,

$\tau$  : ketebalan laminasi inti, dan

$v$  : adalah volume material inti

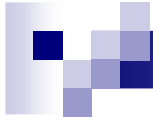
# Dampak Harmonisa, Induktor

## Rugi Tembaga



Daya masuk yang diberikan oleh sumber,  
untuk mengatasi *rugi-rugi inti*,  $P_c$   
untuk mengatasi *rugi-rugi tembaga*,  $P_{cu}$

$$P_{in} = P_c + P_{cu} = P_c + I_f^2 R_1 = V I_f \cos \theta$$



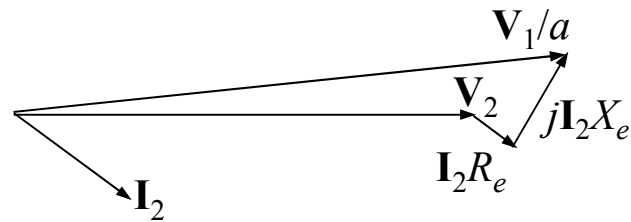
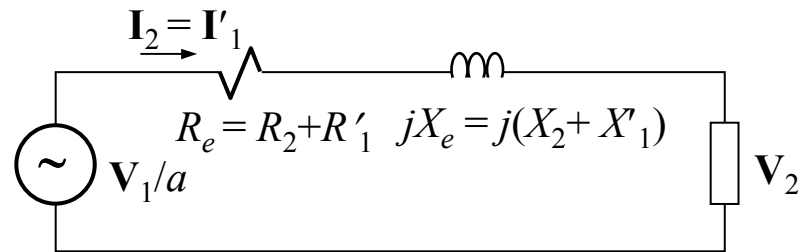
# Dampak pada Transformator



# Dampak Harmonisa, Transformator

## Transformator

### Rangkaian Ekuivalen dan Diagram Fasor



## ***Fluksi Dan Rugi-Rugi Karena Fluksi***

Fluksi magnetik, rugi-rugi histerisis, dan rugi-rugi arus pusar pada inti dihitung seperti halnya pada induktor

### ***Rugi-Rugi Pada Belitan***

Selain rugi-rugi tembaga terjadi rugi-rugi tambahan arus pusar,  $P_l$ , yang ditimbulkan oleh fluksi bocor.

Fluksi bocor selain menembus inti juga menembus konduktor belitan. Rugi arus bocor timbul baik di inti maupun di konduktor belitan.

Rugi arus pusar pada belitan (*stray losses*):  $P_l = K_l f^2 B_m^2$

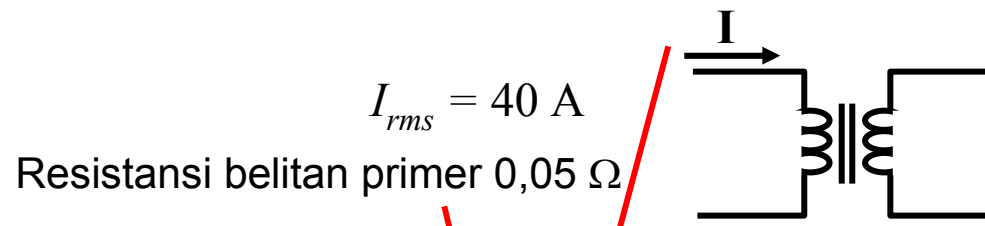
Namun formula ini tak digunakan

Rugi arus pusar dihitung sebagai proporsi dari rugi tembaga, dengan tetap mengingat bahwa rugi arus pusar sebanding dengan kuadrat ferkuensi.

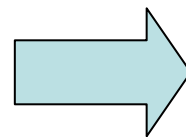
Proporsi ini berkisar antara 2% sampai 15% tergantung dari ukuran transformator

# Dampak Harmonisa, Transformator

## CONTOH-4.7.



Arus ini menimbulkan juga fluksi bocor.  
Fluksi bocor ini menembus konduktor belitan dan menimbulkan rugi arus pusar di konduktor belitan.  
Rugi arus pusar ini = 5% dari rugi tembaga



Rugi tembaga  $P_{cu} = 40^2 \times 0,05 = 80 \text{ W}$

Rugi arus pusar  $5\% \times P_{cu} = 0,05 \times 80 = 4 \text{ W}$

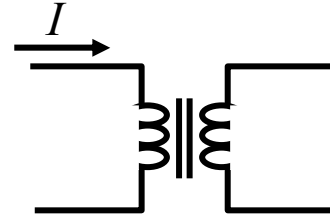
Rugi daya total pada belitan  $80 + 4 = 84 \text{ W}$ .

# Dampak Harmonisa, Transformator

## CONTOH-4.8.

$$I_{1rms} = 40 \text{ A} \quad I_{7rms} = 6 \text{ A}$$

Resistansi belitan primer  $0,05 \Omega$



Rugi arus pular diperhitungkan 10% dari rugi tembaga

Rugi tembaga total:  $P_{cu} = I_{rms}^2 R = (40^2 + 6^2) \times 0,05 = 81,8 \text{ W}$

Rugi arus pular komponen fundamental:

$$P_{l1} = 0,1 \times I_{1rms}^2 R = 0,1 \times 40^2 \times 0,05 = 8 \text{ W}$$

Rugi arus pular harmonisa ke-7:

$$P_{l7} = 0,1 \times 7^2 \times I_{7rms}^2 R = 0,1 \times 7^2 \times 6^2 \times 0,05 = 8,8 \text{ W}$$

**Rugi daya total:**

→  $P_{total} = P_{cu} + P_{l1} + P_{l7} = 81,8 + 8 + 8,8 = 98,6 \text{ W}$

# Dampak Harmonisa, Transformator

## Faktor K

Faktor  $K$  digunakan untuk menyatakan adanya rugi arus pusar pada belitan. Ia menunjukkan berapa rugi-rugi arus pusar yang timbul secara keseluruhan.

Nilai efektif total arus nonsinus  $I_{Trms} = \sqrt{\sum_{n=1}^k I_{nrms}^2}$  A

Rugi tembaga total

$$P_{cu} = R_0 I_{rms}^2 = R_0 \sum_{n=1}^k I_{nrms}^2 = R_0 I_{Trms}^2 \quad \text{W}$$

↑  
Resistansi belitan

Rugi arus pusar total

$$P_K = gR_0 \sum_{n=1}^k n^2 I_{nrms}^2 \quad \text{W}$$

↑  
proporsi terhadap rugi tembaga

$$K = \frac{\sum_{n=1}^k n^2 I_{nrms}^2}{I_{Trms}^2}$$

← faktor rugi arus pusar (*stray loss factor*)

# Dampak Harmonisa, Transformator

Faktor  $K$  dapat dituliskan sebagai

$$K = \sum_{n=1}^k n^2 \frac{I_{nrms}^2}{I_{Trms}^2} = \sum_{n=1}^k n^2 I_{n(pu)}^2$$

$I_{n(pu)} = \frac{I_{nrms}}{I_{Trms}}$

Faktor  $K$  **bukan** karakteristik transformator melainkan **karakteristik sinyal**.

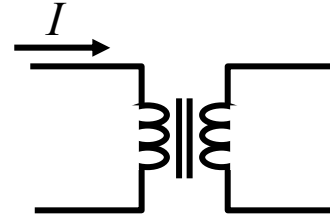
Walaupun demikian suatu transformator harus dirancang untuk mampu menahan pembebanan nonsinus sampai batas tertentu.

# Dampak Harmonisa, Transformator

## CONTOH-4.9.

$$I_{1\text{rms}} = 40 \text{ A} \quad I_{3\text{rms}} = 15 \text{ A} \quad I_{11\text{rms}} = 5 \text{ A}$$

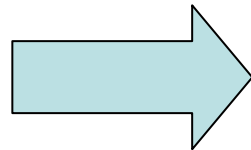
Resistansi belitan primer  $0,08 \Omega$



Rugi arus pusar diperhitungkan 5% dari rugi tembaga

Nilai efektif arus total:  $I_{T\text{rms}} = \sqrt{40^2 + 15^2 + 5^2} = 43 \text{ A}$

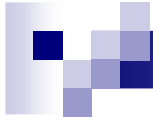
Faktor  $K$ : 
$$K = \frac{40^2 + 3^2 \times 15^2 + 11^2 \times 5^2}{43^2} = 3,59$$



$$P_{cu} = 43^2 \times 0,08 = 148 \text{ W}$$

$$P_l = gP_{cu}K = 0,05 \times 148 \times 3,59 = 26,6 \text{ W}$$

$$P_{tot} = 148 + 26,6 = 174,6 \text{ W}$$



# Tegangan Maksimum



# Dampak Harmonisa, Tegangan Maksimum

## *Tegangan Maksimum Pada Piranti*

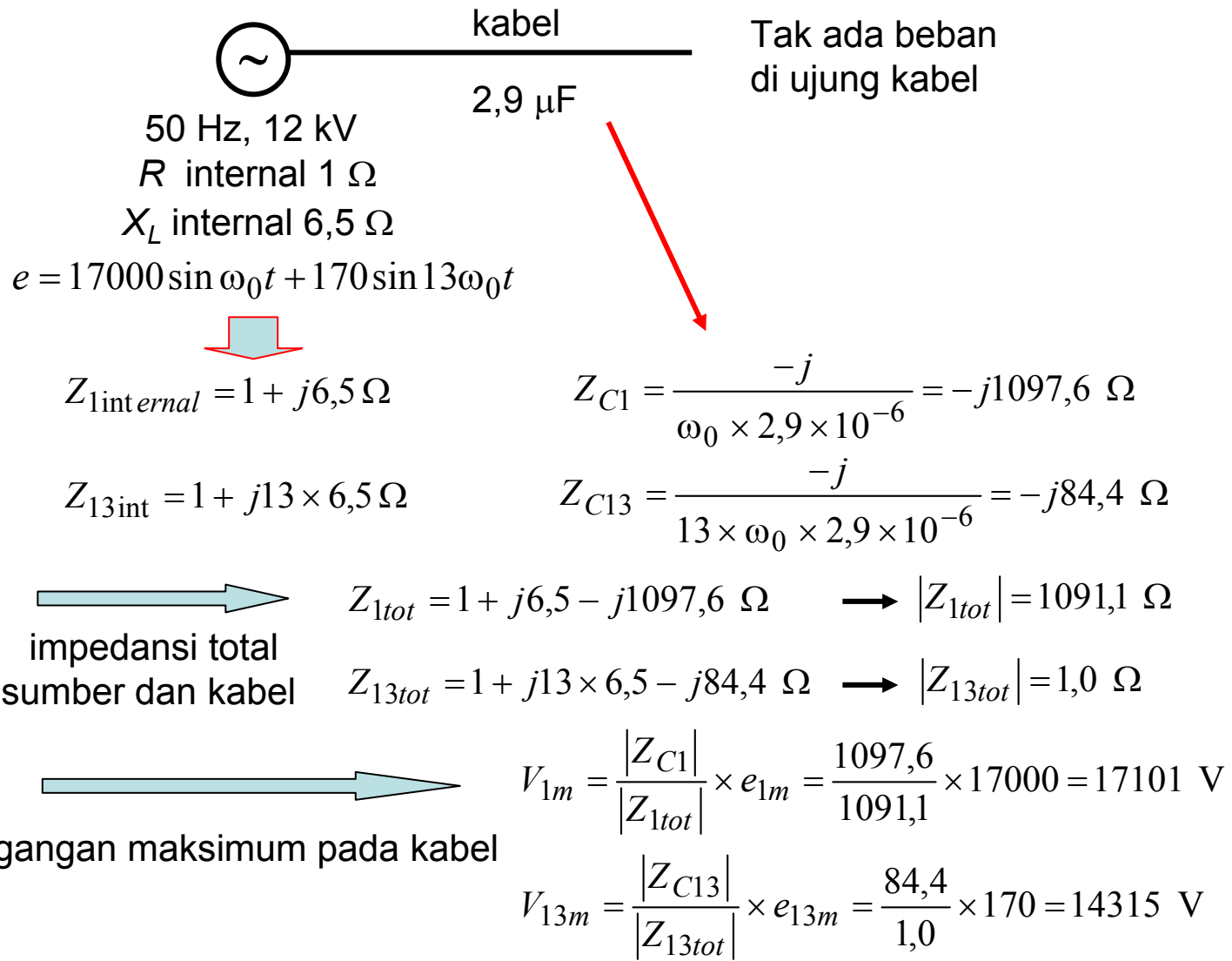
Kehadiran komponen harmonisa dapat menyebabkan piranti mendapatkan tegangan lebih besar dari yang seharusnya.

Piranti-piranti yang mengandung *elemen dinamis*, berisiko mengalami resonansi pada frekuensi harmonisa tertentu

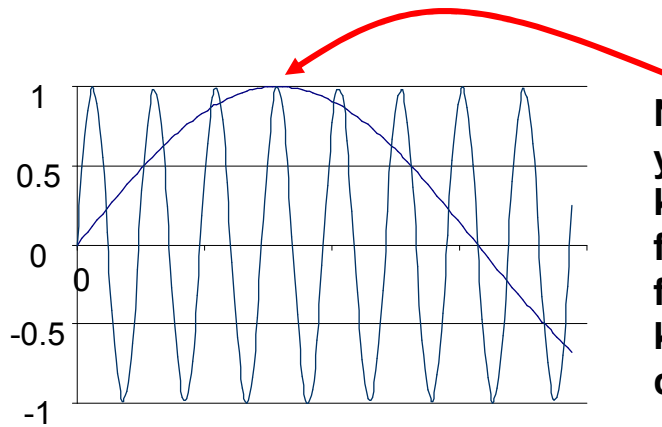
Apabila terjadi resonansi, tegangan fundamental akan bersuperposisi dengan tegangan resonansi dan tegangan maksimum yang terjadi akan lebih tinggi dari tegangan fundamental

# Dampak Harmonisa, Tegangan Maksimum

## CONTOH-4.10.

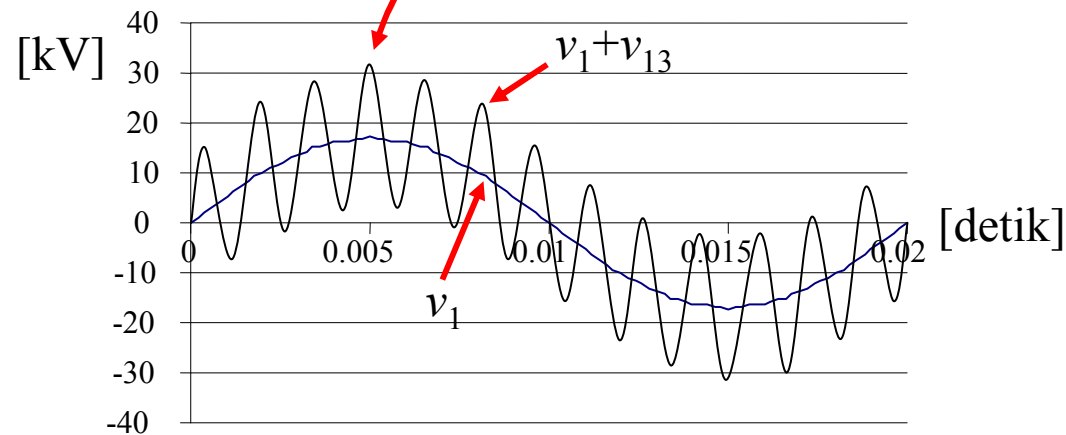


# Dampak Harmonisa, Tegangan Maksimum



Nilai puncak  $V_{1m}$  dan  $V_{13m}$  terjadi pada waktu yang sama yaitu pada seperempat perioda, karena pada harmonisa ke-13 ada 13 gelombang penuh dalam satu perioda fundamental atau 6,5 perioda dalam setengah perioda fundamental. Jadi tegangan maksimum yang diterima kabel adalah jumlah tegangan maksimum fundamental dan tegangan maksimum harmonisa ke-13

$$V_m = V_{1m} + V_{13m} = 17101 + 14315 = 31416 \text{ V} \approx 31,4 \text{ kV}$$



# Dampak Harmonisa, Tegangan Maksimum

## *Partial Discharge*

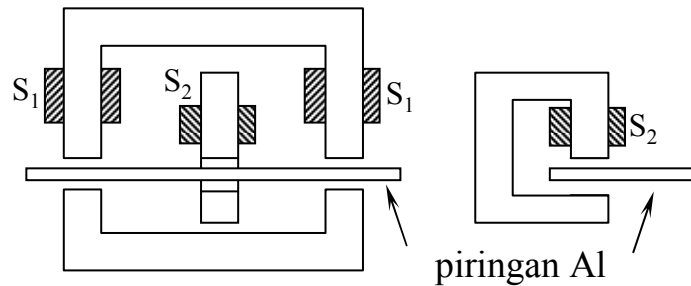
Contoh-4.10. memberikan ilustrasi bahwa adanya harmonisa dapat menyebabkan tegangan maksimum pada suatu piranti jauh melebihi tegangan fundamentalnya.

Tegangan lebih yang diakibatkan oleh adanya harmonisa bisa menyebabkan terjadinya *partial discharge* pada piranti, walaupun sistem bekerja normal, dalam arti tidak ada gangguan

Akibatnya adalah umur piranti akan menjadi lebih pendek dari yang diperkirakan sebelumnya, yang akan menimbulkan kerugian besar secara finansial.

# Dampak Harmonisa, kWh-meter

## kWh-meter Elektromekanik



Kumparan tegangan  $S_1$  dihubungkan pada tegangan sumber sementara kumparan arus  $S_2$  dialiri arus beban

Masing-masing kumparan menimbulkan fluksi magnetik bolak-balik yang menginduksikan arus bolak-balik di piringan aluminium

Interaksi arus induksi dan fluksi magnetik menimbulkan momen putar pada piringan

$$M_e = kf\Phi_v\Phi_i \sin \beta$$

Harmonisa di kumparan arus, akan muncul juga pada  $\Phi_i$

Frekuensi harmonisa sulit untuk direspons oleh kWh meter tipe induksi. Pertama karena kelembaman sistem yang berputar, dan kedua karena kWh-meter ditera pada frekuensi  $f$  dari komponen fundamental, misalnya 50 Hz. Dengan demikian penunjukkan alat ukur tidak mencakup kehadiran arus harmonisa.



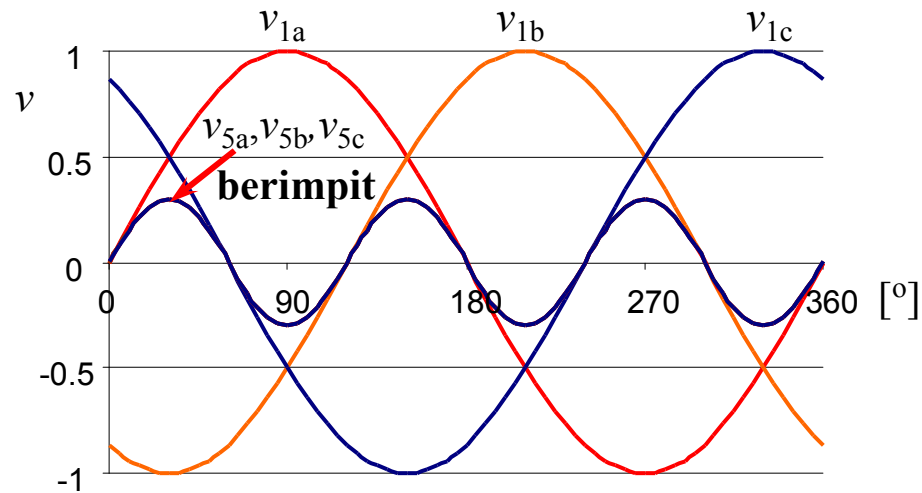
---

## BAB 5

# Harmonisa pada Sistem 3 Fasa

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa

## Harmonisa Ke-3



$$v_{1a} = \sin(\omega t)$$

$$\longrightarrow v_{3a} = \sin(3\omega t)$$

$$v_{1b} = \sin(\omega t - 120^\circ)$$

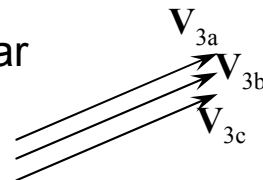
$$\longrightarrow v_{3b} = \sin(3\omega t - 360^\circ) = \sin(3\omega t)$$

$$v_{1c} = \sin(\omega t - 240^\circ)$$

$$\longrightarrow v_{3c} = \sin(3\omega t - 720^\circ) = \sin(\omega t)$$

} kurva berimpit

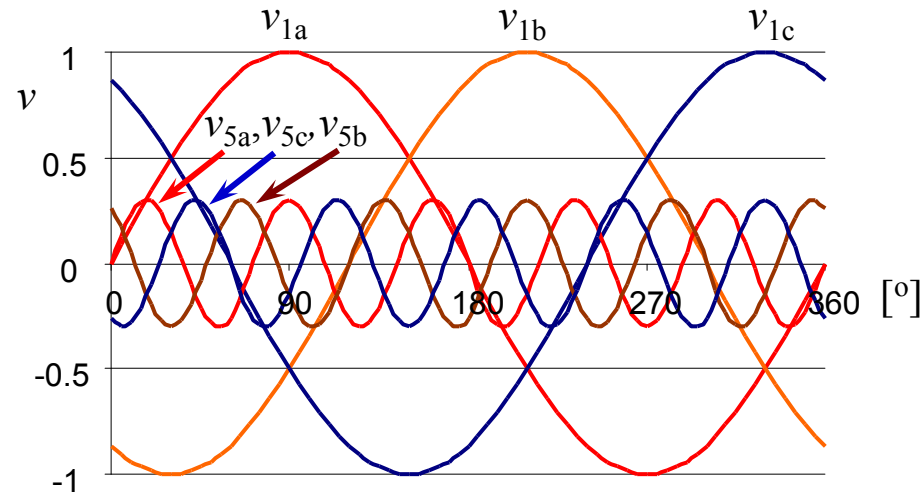
Fasor ketiga fasa tegangan sejajar



Hal serupa terjadi pada harmonisa kelipatan tiga yang lain seperti harmonisa ke-9

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa

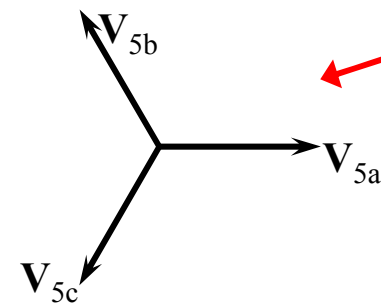
## Harmonisa ke-5



$$\begin{array}{lcl}
 v_{1a} = \sin(\omega t) & \longrightarrow & v_{5a} = \sin(5\omega t) \\
 v_{1b} = \sin(\omega t - 120^\circ) & \longrightarrow & v_{5b} = \sin(5\omega t - 600^\circ) = \sin(3\omega t - 240^\circ) \\
 v_{1c} = \sin(\omega t - 240^\circ) & \longrightarrow & v_{5c} = \sin(5\omega t - 1200^\circ) = \sin(\omega t - 120^\circ)
 \end{array}$$

Urutan fasa harmonisa ke-5

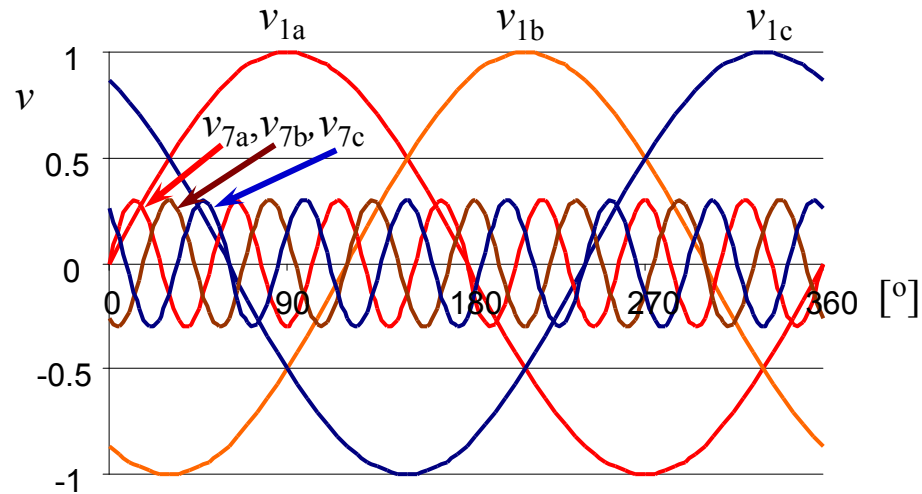
$V_{5a} \rightarrow V_{5c} \rightarrow V_{5b}$   
(urutan negatif)





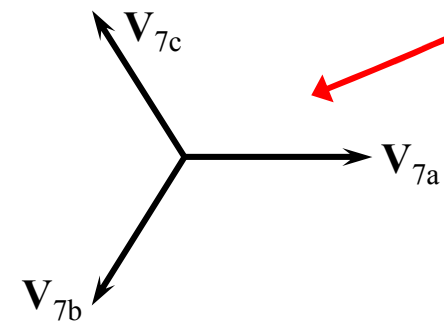
# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa

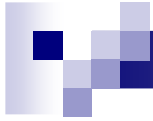
## Harmonisa Ke-7



$$\begin{array}{lcl}
 v_{1a} = \sin(\omega t) & \longrightarrow & v_{7a} = \sin(7\omega t) \\
 v_{1b} = \sin(\omega t - 120^\circ) & \longrightarrow & v_{7b} = \sin(7\omega t - 840^\circ) = \sin(3\omega t - 120^\circ) \\
 v_{1c} = \sin(\omega t - 240^\circ) & \longrightarrow & v_{7c} = \sin(7\omega t - 1680^\circ) = \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{array}$$

Urutan fasa harmonisa ke-7 adalah positif





# **Relasi Fasa-Fasa dan Fasa-Netral**

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Relasi Fasa-Fasa dan Fasa-Netral

## *Relasi Tegangan Fasa-Fasa dan Fasa-Netral*

Pada tegangan sinus murni, relasi antara tegangan fasa-fasa dan fasa-netral dalam pembebanan seimbang adalah

$$V_{ff} = V_{fn} \sqrt{3} = 1,732 V_{fn}$$

Tegangan *fasa - fasa*

Tegangan *fasa - netral*

**Apakah relasi ini berlaku untuk sinyal non-sinus?**

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Relasi Fasa-Fasa dan Fasa-Netral

## CONTOH-5.1.

Tegangan fasa-netral suatu generator 3 fasa terhubung bintang adalah

$$v_s = 200 \sin(\omega t) + 40 \sin(3\omega t) + 25 \sin(5\omega t) + 20 \sin(7\omega t) + 10 \sin(9\omega t)$$

$V_{(f-n) rms}$  setiap komponen:

$$V_{1(f-n)rms} = \frac{200}{\sqrt{2}} = 141,42 \text{ V}$$

$$V_{3(f-n)rms} = 28,28 \text{ V}$$

$$V_{5(f-n)rms} = 17,68 \text{ V}$$

$$V_{7(f-n)rms} = 14,14 \text{ V}$$

$$V_{9(f-n)rms} = 7,07 \text{ V}$$

Nilai efektif tegangan fasa-netral total:

$$V_{(f-n)rms \text{ total}} = \sqrt{141,42^2 + 28,28^2 + 17,68^2 + 14,14^2 + 7,07^2} = 146,16 \text{ V}$$

$V_{(f-f) rms}$  setiap komponen:

$$V_{1f-f} = 244,95 \text{ V}$$

$$V_{3f-f} = 0 \text{ V}$$

$$V_{5f-f} = 26,27 \text{ V}$$

$$V_{7f-f} = 22,11 \text{ V}$$

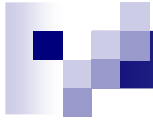
$$V_{9f-f} = 0 \text{ V}$$

Nilai efektif tegangan fasa-fasa total

$$V_{f-f} = \sqrt{244,95^2 + 0 + 26,27^2 + 22,11^2 + 0} = 247,35 \text{ V}$$

$$\frac{V_{f-f}}{V_{f-n}} = \frac{247,35}{146,16} = 1,70$$

$< \sqrt{3}$



# **Hubungan Sumber dan Beban**

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban

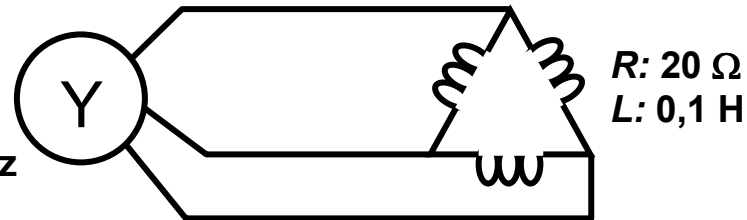
## Generator Terhubung Bintang

Jika belitan jangkar generator terhubung bintang, harmonisa kelipatan tiga yang terkandung pada tegangan fasa-netral tidak muncul pada tegangan fasa-fasa-nya

### CONTOH-5.1.

$$v_{(f-n)} = 800 \sin \omega_0 t + 200 \sin 3\omega_0 t + 100 \sin 5\omega_0 t \text{ V}$$

50 Hz



$$V_{(f-n)1rms} = 800 / \sqrt{2} \text{ V} \longrightarrow V_{(f-f)1rms} = (800 / \sqrt{2}) \sqrt{3} = 800\sqrt{3/2} \text{ V}$$

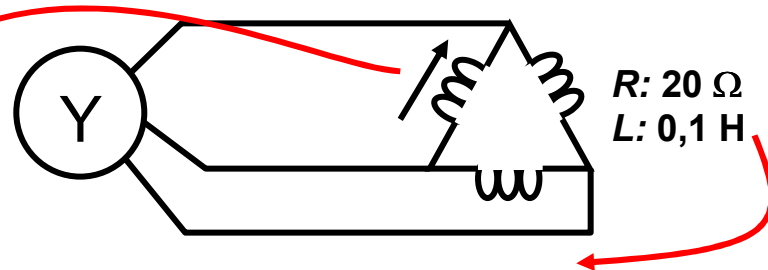
$$V_{(f-n)3rms} = 200 / \sqrt{2} \text{ V} \longrightarrow V_{(f-f)3rms} = 0 \text{ V}$$

$$V_{(f-n)5rms} = 100 / \sqrt{2} \text{ V} \longrightarrow V_{(f-f)5rms} = 100\sqrt{3/2} \text{ V}$$

Setiap komponen berbentuk sinus

$$\longrightarrow V_{(f-f)rms} = \sqrt{800^2 (3/2) + 100^2 (3/2)} = 987,4 \text{ V}$$

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban



Reaktansi beban per fasa  
untuk tiap komponen

$$X_1 = 2\pi \times 50 \times 0,1 = 31,42 \text{ } \Omega$$

$$X_3 = 3X_1 = 94,25 \text{ } \Omega$$

$$X_5 = 5X_1 = 157,08 \text{ } \Omega$$

Impedansi beban per fasa  
untuk tiap komponen

$$|Z_{f1}| = \sqrt{20^2 + 31,42^2} = 37,24 \text{ } \Omega$$

$$|Z_{f3}| = \sqrt{20^2 + 94,25^2} = 96,35 \text{ } \Omega$$

$$|Z_{f5}| = \sqrt{20^2 + 157,08^2} = 158,35 \text{ } \Omega$$

Arus fasa:

$$I_{f1rms} = \frac{V_{ff1rms}}{|Z_{f1}|} = \frac{800\sqrt{3/2}}{37,24} = 26,3 \text{ A}$$

$$I_{f3rms} = \frac{V_{ff3rms}}{|Z_{f1}|} = 0 \text{ A}$$

$$I_{f5rms} = \frac{V_{ff5rms}}{|Z_{f5}|} = \frac{100\sqrt{3/2}}{158,35} = 0,77 \text{ A}$$

$$I_{frms} = \sqrt{26,3^2 + 0,77^2} = 26,32 \text{ A}$$

Daya dan Faktor daya beban

$$P_b = 3 \times I_{frms}^2 \times 20 = 41566 \text{ W} \approx 41,6 \text{ kW}$$

$$|S_b| = 3 \times V_{ff} \times I_f = 3 \times 987,4 \times 26,32 = 77967 \text{ W} \approx 78 \text{ kW}$$

$$f.d. = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{41,6}{78} = 0,53$$

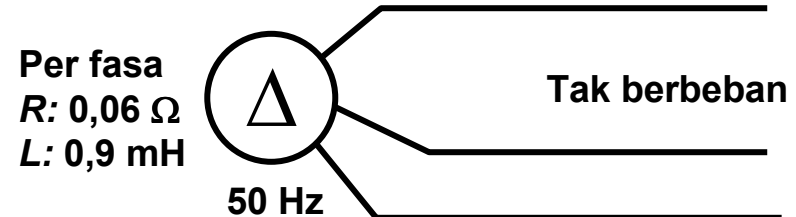
# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban

## Generator Terhubung Segitiga

Jika belitan jangkar generator terhubung segitiga, maka tegangan harmonisa kelipatan tiga akan menyebabkan terjadinya arus sirkulasi pada belitan jangkar

### CONTOH-5.2.

Tegangan fasa-fasa mengandung harmonisa ke-3, -7, -9, dan -15 dengan amplitudo berturut-turut 4%, 3%, 2% dan 1% dari amplitudo tegangan fundamental yang 1500 V



Arus sirkulasi di belitan jangkar yang terhubung segitiga timbul oleh adanya tegangan harmonisa kelipatan tiga, yang dalam hal ini adalah harmonisa ke-3, -9, dan -15

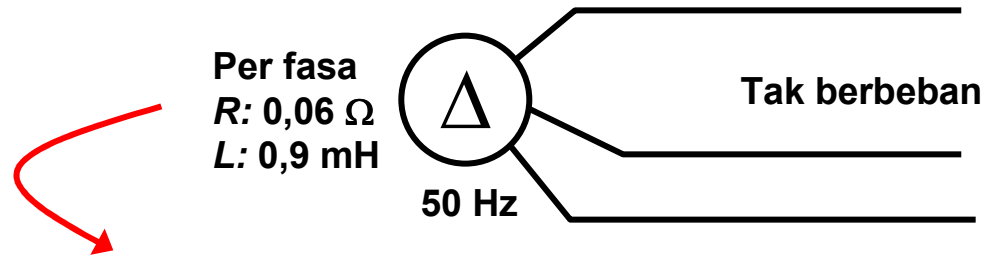
$$V_{3m} = 4\% \times 1500 = 60 \text{ V} \rightarrow V_{3rms} = 60 / \sqrt{2} \text{ V}$$

$$V_{9m} = 2\% \times 1500 = 30 \text{ V} \rightarrow V_{9rms} = 30 / \sqrt{2} \text{ V}$$

$$V_{15m} = 1\% \times 1500 = 15 \text{ V} \rightarrow V_{15rms} = 15 / \sqrt{2} \text{ V}$$



# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban



Reaktansi untuk masing-masing komponen adalah

$$X_1 = 2\pi \times 50 \times 0,9 \times 10^{-3} = 0,283 \Omega$$

$$X_3 = 3 \times X_1 = 0,85 \Omega$$

$$X_9 = 9 \times X_1 = 2,55 \Omega$$

$$X_{15} = 15 \times X_1 = 4,24 \Omega$$

Impedansi setiap fasa untuk komponen harmonisa kelipatan 3

$$|Z_3| = \sqrt{0,06^2 + 0,85^2} = 0,85 \Omega$$

$$|Z_9| = \sqrt{0,06^2 + 2,54^2} = 2,55 \Omega$$

$$|Z_{15}| = \sqrt{0,06^2 + 4,24^2} = 4,24 \Omega$$

Arus sirkulasi:  $I_{3rms} = \frac{60/\sqrt{2}}{0,85} = 49,89 \text{ A}$

$$I_{9rms} = \frac{30/\sqrt{2}}{2,55} = 8,33 \text{ A}$$

$$I_{15rms} = \frac{15/\sqrt{2}}{4,24} = 2,5 \text{ A}$$

→  $I_{sirkulasi(rms)} = \sqrt{48,89^2 + 8,33^2 + 2,5^2} = 50,6 \text{ A}$

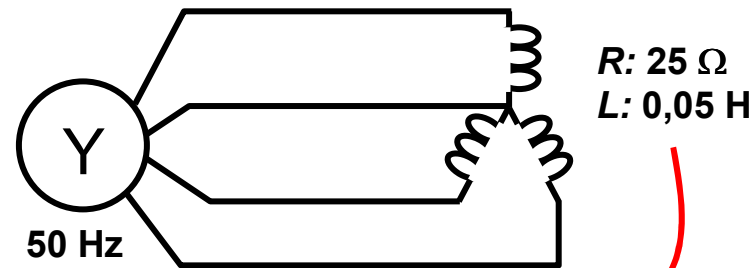
# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban

## Sistem Empat Kawat

Dalam sistem empat kawat, di mana titik netral sumber terhubung ke titik netral beban, harmonisa kelipatan tiga akan mengalir melalui penghantar netral. Arus di penghantar netral ini merupakan jumlah dari ketiga arus di setiap fasa; jadi besarnya tiga kali lipat dari arus di setiap fasa.

### CONTOH-5.2.

$$v_{(f-n)} = 360 \sin \omega_0 t + 60 \sin 3\omega_0 t + 50 \sin 5\omega_0 t \text{ V}$$



Tegangan fasa-netral efektif setiap komponen

$$V_{(f-n)1rms} = 254,6 \text{ V};$$

$$V_{(f-n)3rms} = 42,4 \text{ V};$$

$$V_{(f-n)5rms} = 35,4 \text{ V}$$

Reaktansi per fasa

$$X_1 = 2\pi \times 50 \times 0,05 = 15,70 \text{ } \Omega$$

$$X_3 = 3 \times X_1 = 47,12 \text{ } \Omega$$

$$X_5 = 5 \times X_1 = 78,54 \text{ } \Omega$$

Impedansi per fasa

$$|Z_1| = \sqrt{25^2 + 15,70^2} = 29,53 \text{ } \Omega$$

$$|Z_3| = \sqrt{25^2 + 47,12^2} = 53,35 \text{ } \Omega$$

$$|Z_5| = \sqrt{25^2 + 78,54^2} = 82,42 \text{ } \Omega$$

# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban

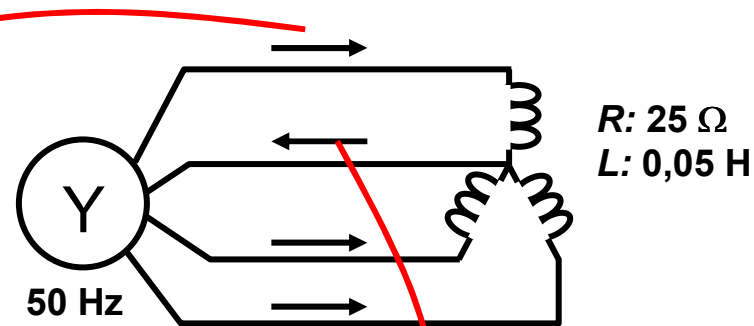
Arus saluran

$$I_{1rms} = \frac{V_{(f-n)1}}{|Z_1|} = \frac{254,6}{29,53} = 8,62 \text{ A}$$

$$I_{3rms} = \frac{42,4}{53,35} = 0,795 \text{ A}$$

$$I_{5rms} = \frac{35,4}{82,42} = 0,43 \text{ A}$$

$$I_{saluran rms} = \sqrt{8,62^2 + 0,795^2 + 0,43^2} = 8,67 \text{ A}$$



Arus di penghantar netral

$$I_{netral} = 3 \times I_{3rms} = 3 \times 0,795 = 2,39 \text{ A}$$



Daya yang diserap beban

$$P_b = 3 \times I_{f-n}^2 \times R$$

$$P_b = 3 \times I^2 \times R = 3 \times 8,67^2 \times 25 = 5636 \text{ W} = 5,64 \text{ kW}$$

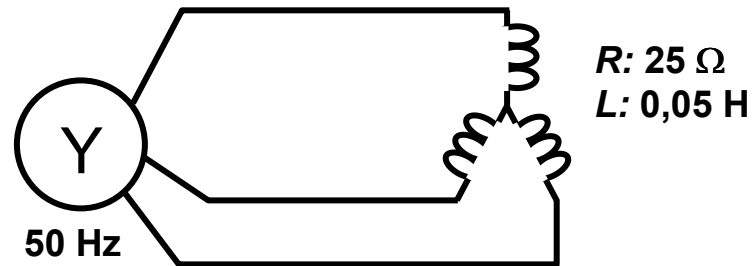
# Harmonisa pada Sistem Tiga Fasa, Hubungan Sumber dan Beban

## Sistem Tiga Kawat

Pada sistem ini tidak ada hubungan antara titik netral sumber dan titik netral beban. Arus harmonisa kelipatan tiga tidak mengalir.

### CONTOH-5.2.

$$v_{(f-n)} = 360 \sin \omega_0 t + 60 \sin 3\omega_0 t + 50 \sin 5\omega_0 t \text{ V}$$



Karena tak ada penghantar netral, arus harmonisa ke-3 tidak mengalir.

$$I_{1rms} = \frac{254,6}{29,53} = 8,62 \text{ A}$$

$$I_{5rms} = \frac{35,4}{82,42} = 0,43 \text{ A}$$

$$I_{saluran rms} = \sqrt{8,62^2 + 0,43^2} = 8,63 \text{ A}$$

Tegangan fasa-fasa setiap komponen

$$V_{(f-f)1} = 360\sqrt{3/2} = 440,9 \text{ V};$$

$$V_{(f-f)3} = 0 \text{ V};$$

$$V_{(f-f)5} = 61,24 \text{ V}$$

$$V_{f-f} = \sqrt{440,9^2 + 0 + 61,2^2} = 445 \text{ V}$$

$$P_b = 3 \times I^2 \times R = 3 \times 8,63^2 \times 25 = 5589 \text{ W} = 5,59 \text{ kW}$$

Courseware  
Analisis Harmonisa

**Sekian**  
**Terimakasih**

Sudaryatno Sudirham