

ANALISA HARMONISA PADA KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

Ferry Rahmat Astianta Bukit ¹⁾

¹⁾Universitas Quality, Jl. Ring Road No. 18 Ngumban Surbakti Medan

Email : ferrerahmatastiantabukit@gmail.com

Abstrak

Motor Induksi tiga Phasa banyak digunakan pada dunia industri, oleh sebab itu motor induksi diharapkan dapat beroperasi secara normal sesuai dengan karakteristik kerja yang dikehendaki. Namun tidak dapat dipungkiri adanya gangguan yang dapat menimbulkan kerusakan terhadap sistem kerja motor Induksi yaitu salah satunya adalah harmonisa. Tujuan dari penulisan artikel ini adalah untuk menjelaskan karakteristik kerja motor induksi tiga phasayang mana menimbulkan harmonisa dan dalam operasi-nya juga mengandung harmonisa. Metode yang digunakan dalam penelitian menganalisis karakteristik kerja dari motor induksi tiga phasa yang dalam operasinya mengandung harmonisa. Bentuk harmonisa dianalisis dengan menggunakan representasi deret Fourier. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada kondisi operasi yang mengandung harmonisa, medan magnet stator akan membangkitkan medan harmonik yang berotasi yang menghasilkan mmf yang berotasi dua arah (*forward* dan *backward*). Pengaruh lain dari harmonik ini, adalah timbulnya torsi harmonik yang bersamaan dengan torsi fundamental mengasilkan getaran (*vibration*) dan kebisingan (*noise*) yang pengaruhnya cukup besar pada operasi motor induksi tiga phasa.

Kata Kunci : Harmonisa, Motor Induksi, Torsi Harmonik.

Abstract

Three Phase Induction Motors are widely used in the industrial world, therefore induction motors are expected to operate normally according to the desired work characteristics. But can not be denied the existence of interference that can cause damage to work induction motor system that one of them is harmonics. The purpose of writing this article is to explain the working characteristics of three phase induction motor which generates harmonics and in operation also contains harmonics. The method used in the study analyzed the working characteristics of three phase induction motor which in its operation contains harmonics. The harmonic form is analyzed by using Fourier series representation. The results obtained from this study indicate that under operating conditions containing harmonics, the stator magnetic field generates a rotating harmonic field that produces a forward and backward mmf mmf. Another effect of this harmonic, is the incidence of harmonic torque which coincides with the fundamental torque produces vibration and noise which has considerable effect on the operation of three phase induction motors.

Keyword : Harmonics, Induction Motors, Harmonic Torque.

Pendahuluan

Dewasa ini timbul isu yang cukup berkembang pesat, yakni masalah faktor kualitas daya listrik. Salah satu permasalahan kualitas daya yang dapat sangat mempengaruhi keadaan suatu sistem tenaga adalah harmonisa. Harmonisa merupakan fenomena yang timbul dari pengoperasian beban listrik yang sebagian besar diakibatkan dari beban non linier, dimana akan terbentuk gelombang yang berfrekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya.

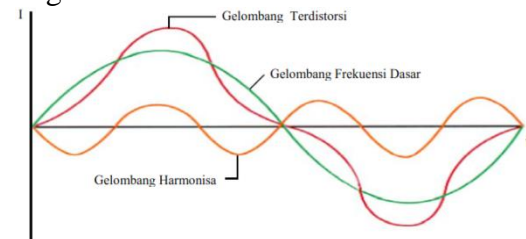
Sumber utama harmonisa adalah beban non-linier yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansi-nya yang tidak konstan maka arus listrik yang dihasilkan tidaklah berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan sehingga beban non-linier tidaklah mematuhi hukum ohm. Gelombang arus listrik yang dihasilkan oleh beban non-linier tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat (*distorsi*).

Terdapatnya harmonisa pada sistem tenaga listrik menimbulkan dampak yang merugikan pada peralatan listrik. Dimana peralatan listrik tersebut akan mengalami penurunan kerja dan bahkan mengalami kerusakan. Dampak harmonisa pada motor induksi adalah meningkatnya rugi-rugi tembaga dan inti yang akan menurunkan efisiensi motor. Selain itu harmonisa ini menimbulkan torsi harmonik yang bersamaan dengan torsi fundamental menghasilkan getaran yang pengaruhnya cukup besar pada operasi motor. Oleh sebab itu, pada

penelitian ini akan dianalisa pengaruh harmonisa terhadap karakteristik kerja motor induksi tiga fasa.

Harmonisa

Harmonisa adalah gelombang-gelombang tegangan dan arus sinusoidal yang pada umumnya mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat (*integer*) dari frekuensi dasarnya. Bilangan bulat pengali frekuensi dasarnya disebut angka urutan harmonisa.



Gambar 1. Gelombang Fundamental yang Terdistorsi Harmonisa ke 3

Sumber Harmonisa Pada Motor Induksi

Motor induksi dalam operasinya juga menghasilkan harmonisa. Pada pembuatannya motor induksi menggunakan material ferromagnetik, adanya material ini pada mesin yang menghasilkan kurva B-H yang tidak linier sehingga menimbulkan efek saturasi (kejenuhan pada inti besi). Fenomena ini mengakibatkan distribusi fluks yang tidak sinusoidal, sehingga menghasilkan GGL induksi yang terdistorsi dan juga mempengaruhi bentuk gelombang arus dan tegangan baik pada belitan stator maupun rotornya. Harmonisa yang dihasilkan dari fenomena ini besaran sesaatnya berubah terhadap waktu yang disebut juga dengan harmonisa waktu (*Time harmonic*). Harmonisa ini juga terjadi pada kondisi sistem yang tidak seimbang.

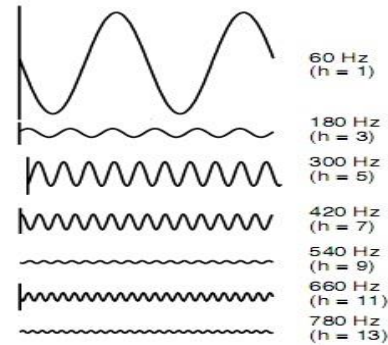
Pengaruh Harmonisa Pada Motor Induksi

Dengan anggapan gelombang-gelombang yang diterima merupakan fungsi simetris setengah gelombang maka harmonisa orde genap tidak muncul pada motor induksi. Begitu juga untuk harmonisa urutan nol tidak mengganggu karakteristik dari torsi motor induksi.

Harmonisa urutan positif (7,13,19,24, ...) memiliki urutan fasa yang sama dengan komponen fundamental sehingga arah medan putar dan torsi yang dihasilkan searah dengan komponen fundamental. Dengan kata lain, torsi yang dihasilkan harmonisa urutan positif akan menambah torsi yang dihasilkan pada komponen fundamental.

Harmonisa urutan negatif (5,11,17,23, ...) memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan komponen fundamental sehingga arah medan putar dan torsi yang dihasilkannya juga berlawanan dengan yang dihasilkan komponen fundamental. Dengan kata lain, torsi yang dihasilkan harmonisa urutan negatif akan mengurangi torsi yang dihasilkan pada komponen fundamental.

Pada harmonisa urutan negatif, harmonisa ke-5 memiliki amplitudo yang lebih besar dari pada harmonisa yang memiliki orde lebih tinggi sehingga terdapat torsi yang dihasilkan-nya memiliki dampak yang lebih menonjol. Begitu juga dengan harmonisa ke-7 pada urutan positif yang memberikan dampak yang lebih menonjol dari pada harmonisa orde yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Gelombang Harmonisa 1, 3, 5, 7, 9, dan 13 untuk Frekuensi Fundamental 60 Hz.

Harmonisa Ruang (Space Harmonic) Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Salah satu harmonisa yang dihasilkan oleh motor induksi adalah harmonisa ruang. Harmonisa ini terjadi pada belitan distribusi, celah (slot), dan gigi-gigi pada stator dan rotor yang akan menghasilkan mmf (*magnetomotive force*) yang non-sinusoidal pada motor induksi, walaupun tegangan sumber yang diberikan pada motor tidak terdistorsi.

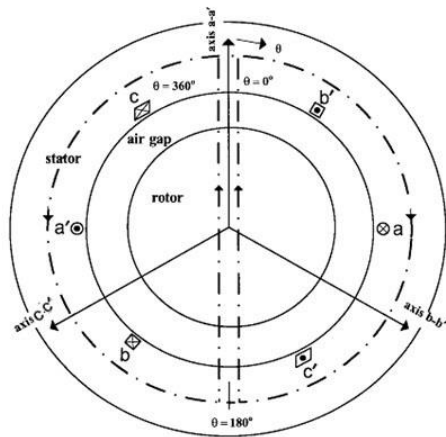
Untuk distribusi yang sinusoidal, maka persamaan mmf (*magnetomotive force*) nya dapat ditulis :

$$\begin{aligned} F_a &= \{A_1 \cos \theta\}i_a \\ F_b &= \{A_1 \cos(\theta - 120^\circ)\}i_b \\ F_c &= \{A_1 \cos(\theta - 240^\circ)\}i_c \end{aligned} \quad (1)$$

Dengan persamaan arus sinusoidal nya adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} i_a(t) &= i_m \cos \omega_1 t \\ i_b(t) &= i_m \cos(\omega_1 t - 120^\circ) \\ i_c(t) &= i_m \cos(\omega_1 t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

Berikut ini digambarkan diagram phasor untuk fluksi tiga fasa dari mmf yang original bersal dari fasa a-a', b-b', dan c-c', masing-masing beda sudut 120°, yang diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Phasor Fluksi Tiga Fasa Pada Motor Induksi

Untuk persamaan mmf yang nonsinusoidal (yang terdiri dari harmonisa fundamental, harmonisa ke 3, 5, 7, dan seterusnya), adalah sebagai berikut :

$$F_a = \{A_1 \cos \theta + A_3 \cos 3\theta + A_5 \cos 5\theta + \dots + A_n \cos n\theta\} i_a(t)$$

$$F_b = \left\{ \begin{array}{l} A_1 \cos(\theta - 120^\circ) + A_3 \cos 3(\theta - 120^\circ) + \\ A_5 \cos 5(\theta - 120^\circ) \\ + \dots \\ + A_n \cos n(\theta - 120^\circ) \end{array} \right\} i_b(t)$$

$$F_c = \left\{ \begin{array}{l} A_1 \cos(\theta - 240^\circ) + A_3 \cos 3(\theta - 240^\circ) \\ + A_5 \cos 5(\theta - 240^\circ) \\ + \dots \\ + A_n \cos n(\theta - 240^\circ) \end{array} \right\} i_c(t) \quad (3)$$

Dimana n merupakan urutan harmonisa = 1, 2, 3, 4, 5, dan seterusnya.

Dengan memperhitungkan harmonisa fundamental, harmonisa ketiga, dan harmonisa kelima, maka besarnya mmf total adalah :

$$F_{tot}(\theta, t) = F_a + F_b + F_c \quad (4)$$

Dimana :

$$F_a = \{A_1 \cos \theta + A_3 \cos 3\theta + A_5 \cos 5\theta\} i_m \cos \omega_1 t \quad (5)$$

$$F_a = A_1 i_m \cos \theta \cos \omega_1 t + A_3 i_m \cos 3\theta \cos \omega_1 t + A_5 i_m \cos 5\theta \cos \omega_1 t$$

Bila persamaan (5) disubstitusikan dengan persamaan transformasi trigonometri berikut:

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} \{ \cos(x - y) + \cos(x + y) \}$$

Sehingga diperoleh :

$$F_a = \frac{A_1 i_m}{2} \{ \cos(\theta - \omega_1 t) + \cos(\theta + \omega_1 t) \} + \frac{A_3 i_m}{2} \{ \cos(3\theta - \omega_1 t) + \cos(3\theta + \omega_1 t) \} + \frac{A_5 i_m}{2} \{ \cos(5\theta - \omega_1 t) + \cos(5\theta + \omega_1 t) \} \quad (6.a)$$

Sama halnya untuk fasa b dan c, disubstitusikan dengan persamaan trigonometri, maka untuk fasa b dan c dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_b = \frac{A_1 i_m}{2} \{ \cos(\theta - \omega_1 t) + \cos(\theta + \omega_1 t - 240^\circ) \} + \frac{A_3 i_m}{2} \{ \cos(3\theta - \omega_1 t - 240^\circ) + \cos(3\theta + \omega_1 t - 480^\circ) \} + \frac{A_5 i_m}{2} \{ \cos(5\theta - \omega_1 t - 480^\circ) + \cos(5\theta + \omega_1 t - 720^\circ) \} \quad (6.b)$$

$$F_c = \frac{A_1 i_m}{2} \{ \cos(\theta - \omega_1 t) + \cos(\theta + \omega_1 t + 240^\circ) \} + \frac{A_3 i_m}{2} \{ \cos(3\theta - \omega_1 t + 240^\circ) + \cos(3\theta + \omega_1 t + 480^\circ) \} + \frac{A_5 i_m}{2} \{ \cos(5\theta - \omega_1 t + 480^\circ) + \cos(5\theta + \omega_1 t + 720^\circ) \} \quad (6.c)$$

Dengan demikian, besarnya mmf total pada persamaan 4. dapat disederhanakan menjadi :

$$F_{tot}(\theta, t) = \frac{3}{2} A_1 i_m \cos(\omega_1 t - \theta) + \frac{3}{2} A_5 i_m \cos(\omega_1 t - 5\theta) \quad (7)$$

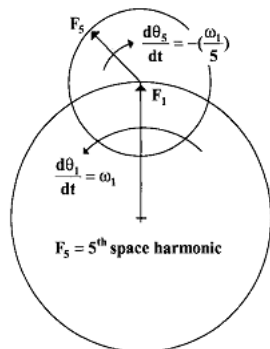
Dengan kecepatan sudut (anguler) mmf fundamentalnya $\frac{d\theta_1}{dt}$ adalah :

$$\begin{aligned} \omega_1 \cdot t - \omega_1 &= 0, \\ \omega_1 &= \omega_1 \cdot t, \\ \frac{d\theta_1}{dt} &= \omega_1 \end{aligned}$$

Dan kecepatan sudut dengan mmf yang terdistorsi harmonisa ruang yang kelima $\frac{d\theta_5}{dt}$ adalah :

$$\begin{aligned} \omega_1 \cdot t + 5\theta_5 &= 0, \\ 5\theta_5 &= -\omega_1 \cdot t, \\ \frac{d\theta_5}{dt} &= -\frac{\omega_1}{5} \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 7 diatas, dapat dilihat bahwa besarnya total mmf terdiri dari harmonisa fundamental dan harmonisa kelima yang dapat digambar-kan pada grafik dari harmonisa ruang yang terjadi. Perhatikan Gambar 4



Gambar 4. Grafik Harmonisa Fundamental dan Harmonisa Kelima pada Mesin Induksi Berputar Dengan Arah yang Berlawanan

Grafik yang memperlihatkan harmonisa ruang (*spatial harmonic*), dengan hadirnya harmonisa fundamental, dan harmonisa kelima, ditunjukkan pada Gambar 4 di atas. Dengan catatan bahwa mmf harmonisa ketiga tidak diperhitungkan (dikarenakan merupakan urutan nol).

Tabel 1. Harmonisa Ruang Urutan Positif, Negatif, dan Nol

Spatial harmonic sequence	+	-	0
Spatial harmonic order	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12
	13	14	15

Umumnya harmonisa genap dan harmonisa kelipatan tiga (*triplen harmonics*), pada sistem tiga fasa yang seimbang, tidak akan muncul, karena berharga nol.

Persamaan umum harmonisa ruang (*spatial harmonic*) dapat ditulis :

$$\frac{d\theta_h}{dt} = \left(\frac{+}{0}\right) \frac{\omega_1}{h} \quad (8)$$

Harmonisa Waktu (*Time Harmonics*) Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Untuk sitem tiga fasa yang seimbang, secara matematis medan putar yang dihasilkan akan berotasi searah dengan jarum jam. Dalam hal ini kita asumsikan bahwa belitan sudah dirancang sedemikian rupa sehingga semua harmonisa ruang dapat ditiadakan (tidak diperhitungkan), maka untuk mmf pada fasa *a* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_a = A_1 \cos \theta i_a(t) \quad (9)$$

Bila motor induksi tiga fasa dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa seimbang, yang mana arusnya mengandung harmonisa fundamental dan harmonisa waktu kelima.

Maka persamaan arus nya tersebut untuk $\omega_1 = 2\pi f_1$ adalah :

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \{I_{m1} \cos \omega_1 t + I_{m5} \cos 5\omega_1 t\} \\ i_b(t) &= \{I_{m1} \cos(\omega_1 t - 120^\circ) + \\ &I_{m5} \cos(5\omega_1 t - 120^\circ)\} i_c(t) \end{aligned}$$

$$i_c(t) = \{I_{m1} \cos(\omega_1 t + 120^\circ) + I_{m5} \cos(5\omega_1 t + 120^\circ)\} \quad (10)$$

Dengan demikian untuk persamaan MMF fasa *a*, *b*, dan *c* yang mengandung harmonisa waktu kelima adalah sebagai berikut :

$$F_a = A_1 \cos(\theta) \{I_{m1} \cos \omega_1 t + I_{m5} \cos 5\omega_1 t\}$$

$$F_b = A_1 \cos(\theta - 120^\circ) \{I_{m1} \cos(\omega_1 t - 120^\circ) + I_{m5} \cos(5\omega_1 t - 120^\circ)\}$$

$$F_c = A_1 \cos(\theta + 120^\circ) \{I_{m1} \cos(\omega_1 t + 120^\circ) + I_{m5} \cos(5\omega_1 t + 120^\circ)\} \quad (11)$$

Total MMF nya adalah :

$$F_{tot} = F_a + F_b + F_c$$

Bila persamaan 11. dikembangkan dan disubstitusikan dengan persamaan transfor-masi trigonometri berikut :

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} \{ \cos(x - y) + \cos(x + y) \}$$

Maka akan diperoleh :

$$F_a = \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta - \omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta + \omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta + 5\omega_1 t)$$

$$F_b = \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta - \omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta + \omega_1 t - 240^\circ) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t - 240^\circ)$$

$$F_c = \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta - \omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta + \omega_1 t + 240^\circ) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t + 240^\circ) \quad (12)$$

Maka, total mmf nya adalah :

$$F_{tot} = \left(\frac{A_1 i_{m1}}{2}\right) \cos(\theta - \omega_1 t) + \left(\frac{A_1 i_{m5}}{2}\right) \cos(\theta - 5\omega_1 t) \quad (13)$$

Kecepatan sudut untuk harmonisa waktu kelima $\frac{d\theta_5}{dt}$ adalah :

$$\theta_5 - 5\omega_1 \cdot t = 0, \\ \theta_5 = 5\omega_1 \cdot t,$$

$$\frac{d\theta_5}{dt} = 5\omega_1$$

Untuk sistem yang mengandung komponen arus fundamental dan harmonisa kelima dimana harmonisa kelima ini berotasi dengan arah yang berlawanan dengan arah jarum jam, maka dapat ditulis :

$$i_a(t) = \{I \cos \omega_1 t + I_{m5} \cos 5\omega_1 t\}$$

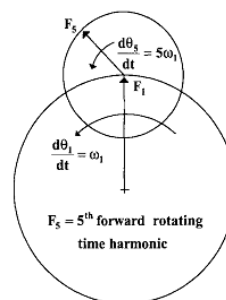
$$i_b(t) = \{I_{m1} \cos(\omega_1 t - 120^\circ) + I_{m5} \cos(5\omega_1 t + 120^\circ)\}$$

$$i_c(t) = \{I_{m1} \cos(\omega_1 t + 120^\circ) + I_{m5} \cos(5\omega_1 t - 120^\circ)\} \quad (14)$$

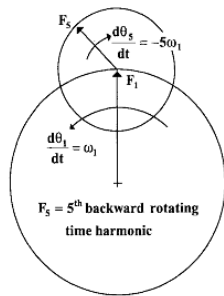
Maka kecepatan sudut untuk harmonisa kelima :

$$\frac{d\theta_5}{dt} = -5\omega_1$$

Phasor diagram berikut ini memperlihatkan arah perputaran yang maju pada fundamentalnya, dan pada harmonisa kelima nya, yang diperlihatkan pada Gambar 5. Sedangkan untuk perputaran yang maju pada fundamentalnya dan perputaran yang mundur pada harmonisa kelima, yang diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Phasor Diagram yang Memperlihatkan Perputaran Arah Maju pada Fundamentalnya, dan pada Harmonisa Ke- 5.



Gambar 6. Phasor Diagram yang Memperlihatkan Perputaran Arah Maju pada Fundamentalnya, dan Perputaran Arah Mundur pada Harmonisa Ke-5.

Adanya arah maju dan mundur Pada medan putar yang dihasilkan oleh harmonisa urutan positif, negatif, dan nol sehingga menghasilkan harmonisa torsi poros. Oleh karena itu, harmonisa waktu memiliki dampak penting untuk diperhatikan pada motor induksi tiga fasa.

Hasil Dan Pembahasan

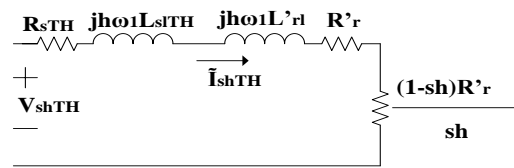
Gelombang non-sinus periodik dalam interval waktu dapat diwakili oleh jumlah dari fundamental dan serangkaian perintah yang lebih tinggi dari komponen harmonik pada frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat (integral) dari komponen fundamental.

Bentuk gelombang terdistorsi tersebut dianalisis dengan menggunakan representasi Deret Fourier.

1.Torsi Fundamental dan Torsi Hamonik Pada Motor Induksi

Untuk frekuensi fundamental (h = 1), maka akan diperoleh torsi fundamental :

$$T_{e1} = \frac{1}{\omega_{s1}} \frac{q_1 V^2 s_{1TH} \frac{R'_r}{s_1}}{\left(R_{sTH} + \frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (\omega_1)^2 (L_{s1TH} + L'_{r1})^2} \quad (15)$$



Gambar 7. Rangkaian Thevenin Motor Induksi yang Mengandung Harmonik ke-h

Dari Gambar 7. diatas didapat besar arus strating untuk harmonisa ke h, adalah :

$$\tilde{I}_{shTH} = \frac{\tilde{V}_{shTH}}{\left(R_{sTH} + \frac{R'_r}{s_h}\right) + jh\omega_1(L_{s1TH} + L'_{r1})} \quad (17)$$

Dan untuk torsi harmonik nya adalah sebagai berikut :

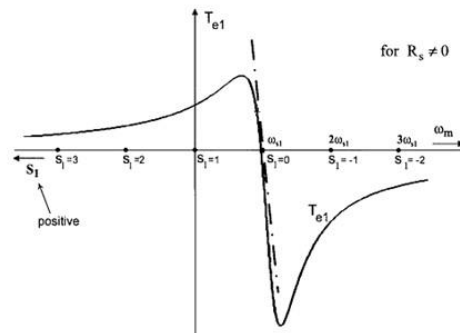
$$T_{eh} = \frac{1}{\omega_{sh}} \frac{q_1 V^2 s_{hTH} \frac{R'_r}{s_h}}{\left(R_{sTH} + \frac{R'_r}{s_h}\right)^2 + (h\omega_1)^2 (L_{s1TH} + L'_{r1})^2} \quad (18)$$

Dimana :

q = jumlah fasa

h = urutan harmonik

ω₁ = kecepatan sudut elektrik (ω₁ = 2πf₁)



Gambar 8. Torsi Elektrik Fundamental Motor Induksi (T_{e1}) Sebagai Fungsi dari Kecepatan Sudut dan Slip S₁

Torsi fundamental yang dimaksud untuk slip fundamental, diperlihatkan pada Gambar 8. Dimana T_{e1} torsi elektrik fundamental motor dan S₁ sebagai slip fundamental.

2.Slip Fundamental dan Slip Harmonik Pada Motor Induksi

Besarnya slip fundamental dapat dihitung menurut rumus berikut ini :

$$s_1 = \frac{n_{s1} - n_m}{n_{s1}} = \frac{\omega_{s1} - \omega_m}{\omega_{s1}} \quad (19)$$

$$s_1 = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_{s1}} \quad \longrightarrow \quad \frac{\omega_m}{\omega_{s1}} = 1 - s_1$$

Dimana $\omega_{s1} = \frac{\omega_1}{p/2}$ adalah kecepatan sudut sinkron , dan ω_m adalah kecepatan sudut poros (rotor).

Untuk besarnya slip yang mengandung harmonik, maka persamaannya menjadi :

$$s_h = \frac{h\omega_{s1} - \omega_m}{h\omega_{s1}} \quad (20)$$

Dimana $\omega_{s1} = \frac{\omega_1}{p/2}$ dan ω_1 adalah kecepatan sudut elektrik dimana $\omega_1 = 2\pi f_1$ dan p merupakan jumlah kutub.

Bila arah rotasi mmf harmonik termasuk dalam perhitungan, maka dilakukan penjumlahan arah dimana arah fundamental maju (*forward*), arah mmf harmonik kelima mundur (*backward*), arah harmonik ketujuh adalah maju (*forward*). Arah dari masing-masing harmonik dapat dilihat pada tabel 1.

Untuk motor yang beroperasi pada kondisi $\omega_m < \omega_{s1}$, maka nilai slip untuk komponen harmonik kelima adalah :

$$s_5 = \frac{-5\omega_{s1} - \omega_m}{-5\omega_{s1}} \quad (21)$$

Dimana $-5\omega_{s1}$ menyatakan harmonik kelima arah mundur (*backward*):

$$s_5 = \frac{5\omega_{s1} + \omega_m}{5\omega_{s1}} \quad (22)$$

Untuk harmonik ketujuh yang memiliki arah maju (*forward*):

$$s_7 = \frac{7\omega_{s1} - \omega_m}{7\omega_{s1}} \quad (23)$$

Dengan demikian, dari persamaan 22 dan 23 diatas dapat disimpulkan bahwa persamaan slip

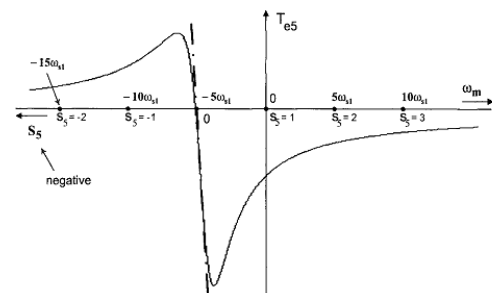
yang mengandung harmonik dapat ditulis sebagai berikut :

$$s_h = \frac{h\omega_{s1} - (\pm)\omega_m}{h\omega_{s1}} \quad (24)$$

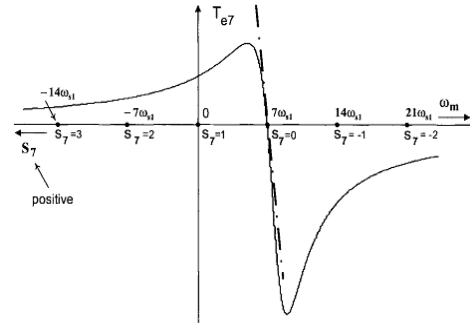
(+) : untuk arah medan putar maju (*Forward*)

(-) : untuk arah medan putar mundur (*backward*)

Gambar torsi harmonik motor induksi sebagai fungsi kecepatan sudut ω_m dan slip harmonik s_5 dan s_7 .



Gambar 9. Torsi Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-5



Gambar 10. Torsi Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-7

Dari Gambar 10. dapat dilihat, pada torsi elektrik ketujuh (T_{e7}) untuk $s_7 = 0$ bernilai positif dengan kecepatan sudut sinkronnya $7\omega_{s1}$.

Bila ω_{s1} diambil sebagai referensi kecepatan sudut, maka slip untuk harmonik kelima adalah :

$$s_5^{(1)} = \frac{5\omega_{s1} + \omega_m}{\omega_{s1}} \quad (25)$$

Dimana $s_5^{(1)}$ merupakan pantulan (*reflected*) dari slip harmonik ke-5.

Selanjutnya, pantulan harmonik ke-7 dapat ditulis :

$$s_7^{(1)} = \frac{7\omega_{s1} - \omega_m}{\omega_{s1}} \quad (26)$$

Dimana $s_7^{(1)}$ merupakan pantulan (*reflected*) dari slip harmonik ke-7.

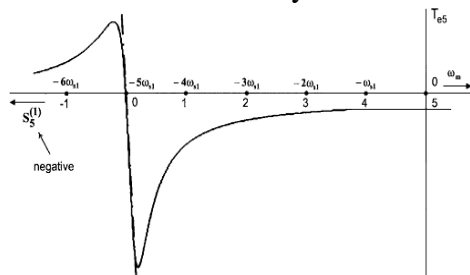
Secara umum, persamaan untuk pantulan slip harmonik ini, dapat ditulis :

$$s_h^{(1)} = \frac{h\omega_{s1} - (\pm)\omega_m}{\omega_{s1}}, \quad (27)$$

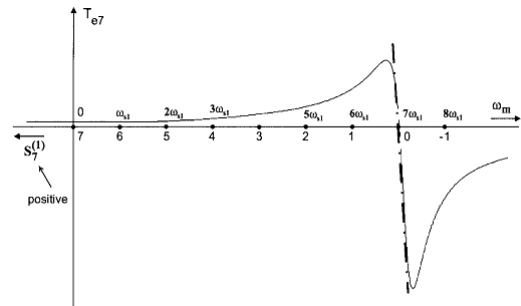
(+) : untuk arah medan putar maju (*Forward*)

(-) : untuk arah medan putar mundur (*backward*)

Untuk memahami efek gabungan dari torsi harmonik dan torsi fundamental, maka dilakukan plot karakteristik torsi harmonik (T_{eh}) dengan pantulan slip harmonik ($s_h^{(1)}$). Gambar 11 berikut ini menunjukkan torsi harmonik ke-5 (T_{eh5}) dengan pantulan slip harmonik ($s_5^{(1)}$), sedangkan pada Gambar 12 untuk harmonik ke-7 nya.



Gambar 11. Torsi Harmonik Ke-5 Sebagai Fungsi Kecepatan Sudut Rotor dan Slip Harmonik yang Dipantulkan.



Gambar 12. Torsi Harmonik Ke-7 Sebagai Fungsi Kecepatan Sudut Rotor dan Slip Harmonik yang Dipantulkan.

Hubungan antara slip fundamental (s_1) dengan slip harmonik yang direfleksikan (pantulan dari slip harmonik) ($s_h^{(1)}$) adalah :

$$\begin{aligned} s_h^{(1)} &= \frac{h\omega_{s1} - \omega_m}{\omega_{s1}} = \frac{\omega_{s1} - \omega_m}{\omega_{s1}} + \frac{(h-1)\omega_{s1}}{\omega_{s1}} \\ &= 1 - \frac{\omega_{s1}}{\omega_{s1}} + h - 1 = h(1 - s_1) \end{aligned}$$

Maka sebaliknya, pantulan slip harmonik dengan slip fundamental :

$$s_h^{(1)} = s_1 + (h - 1)$$

Untuk harmonik ke-5 diperoleh :

$$s_5^{(1)} = -s_1 + 6$$

Sedangkan untuk harmonik ke-7:

$$s_7^{(1)} = s_1 + 6$$

Ingat bahwa :

$$s_5^{(1)} = \frac{5\omega_{s1} + \omega_m}{\omega_{s1}}$$

Umumnya, pantulan slip harmonik ($s_h^{(1)}$) merupakan fungsi linier terhadap slip fundamental (s_1), sehingga dapat juga ditulis

$$s_h^{(1)} = s_1 + (h - 1)$$

untuk medan putar arah maju (*forward*)

$$s_h^{(1)} = s_1 + (h + 1)$$

untuk medan putar arah mundur (*backward*)

Hubungan antara pantulan slip harmonik ($s_h^{(1)}$) Dengan slip harmonik itu sendiri (s_h), ditentukan sebagai : $s_h^{(1)} = f(s_h)$. dimana slip harmoniknya adalah :

$$s_h = \frac{h\omega_{s1} - \omega_m}{h\omega_{s1}}$$

$$= \frac{\omega_{s1} - \omega_m}{h\omega_{s1}} + \frac{(h-1)\omega_{s1}}{h\omega_{s1}}$$

$$s_1 = \frac{\omega_{s1} - \omega_m}{\omega_{s1}}$$

$$s_h = \frac{(h-1)\omega_{s1}}{h\omega_{s1}} + \frac{s_1}{h}$$

Untuk $s_h^{(1)} = s_1 + (h-1)$, harmonik perputaran maju, dapat ditentukan :

$$s_1 = s_h^{(1)} - (h-1)$$

Atau

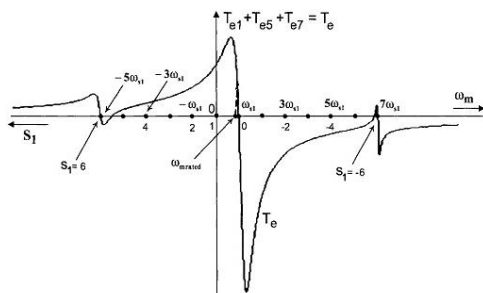
$$s_h = \frac{(h-1)\omega_{s1}}{h\omega_{s1}} + \frac{s_h^{(1)} - (h-1)}{h}$$

$$= \frac{(h-1)}{h} + \frac{s_h^{(1)}}{h} - \frac{(h-1)}{h}$$

$$= \frac{s_h^{(1)}}{h}$$

Sehingga untuk persamaan total torsi elektriknya :

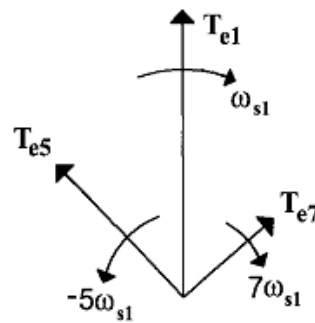
$T_e = T_{e1} + T_{e5} + T_{e7}$, diperlihatkan oleh gambar 13.



Gambar 13. Karakteristik Torsi Elektrik Untuk Fundamental, Harmonik Ke-5 dan Ke-7 Sebagai Fungsi Kecepatan Sudut dan Slip s_1

Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa terjadinya distorsi dalam karakteristik torsi motor induksi tiga fasa. Selain itu harmonisa juga

dapat mengakibatkan slip motor induksi lebih tinggi dari biasanya. Ketika $\omega_m = \omega_{mrated}$, maka total torsi elektrik $T_e = T_{e1} + T_{e5} + T_{e7}$,dimana T_{e1} dan T_{e7} adalah torsi yang bersifat motoring, sedangkan T_{e5} , bersifat breaking. Untuk mengetahui arah putaran dari masing-masing torsi, maka digambarkan dalam grafik phasor seperti yang ditunjukkan Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Phasor Untuk Torsi Elektrik Harmonik Fundamental, ke-5, dan ke-7

Dari Gambar 14, dapat kita lihat bahwa harmonisa ke-7 menghasilkan medan putar yang searah dengan komponen fundamental sehingga arah harmonik ke-7 juga searah dengan torsi fundamental yaitu arah maju (searah dengan arah jarum jam), sedangkan Harmonisa ke-5 menghasilkan medan putar yang berlawanan arah dengan komponen fundamental sehingga torsi harmonik ke-5 juga berlawanan dengan torsi fundamental yaitu arah mundur. Interaksi antara T_{e1} , T_{e5} , dan T_{e7} inilah yang menimbulkan getaran dan kebisingan yang apabila tidak ditindaklanjuti maka akan menimbulkan kerusakan.

Kesimpulan

Motor induksi tiga fasa yang beroperasi pada kondisi harmonisa maka medan magnet stator akan membangkitkan medan harmonik yang berotasi menghasilkan mmf yang berotasi dua arah (*forward* dan *backward*). Dimana Harmonisa urutan positif menghasilkan arah medan putar dan torsi yang searah komponen fundamental, sedangkan Harmonisa urutan negatif menghasilkan arah medan putar dan torsi yang berlawanan dengan yang dihasilkan komponen fundamental, sehingga mengakibatkan perubahan karakteristik torsi motor induksi tiga fasa. Pengaruh lain dari harmonik ini, adalah timbulnya torsi harmonik yang bersamaan dengan torsi fundamental menghasilkan getaran (*vibration*) dan kebisingan yang pengaruh-nya cukup besar pada operasi motor induksi tiga fasa.

Daftar Pustaka

- Suheta Titiek, Haryudo.S.I. "Pengaruh Harmonisa Pada Gardu Trafo Tiang Daya 200 kVA di PLN APJ Surabaya Utara". UNESA
- Priliasari Fika, Gusmedi Herri, *Studi Pengaruh harmonisa pada arus listrik terhadap besarnya penurunan kapasitas daya (Kva) terpasang transformator Distribusi*. Electrician Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro.
- Fuchs, Ewald F dan Mohammad A.S. Masoum. 2008. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. New York; Elsevier Academic Press.
- Arrilaga, Jos, Bruce C Smith, Neville E. Watson, dan Alan R Wood. 1997. *Power System Harmonic Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Bimbira, 1994, *Electric Machinery (Theory, Performance, and Applications)*, Khanna Publisher, Nai Sarak-Delhi.
- Chapman, Stephen J, *Electric Machinery Fundamentals, 3rd Edition*, McGraw – Hill Book Company, Singapore, 1999.
- Sankran, C. 2002. *Power Quality*. New York: CRC Press.
- Dugan, Roger C. dkk. 2004. *Electric Power System Quality*. Edisi Kedua. McGraw-Hill. Jakarta, 2001.
- Khoobro Amir, Krishna Mahesh, *Effect Of System Harmonics and Unbalanced Voltage on Electro-magnetic Performance of Induction Motors*, University of Texas at Arlington.