

ANALISA PENGARUH TAHANAN ROTOR TAK SEIMBANG TERHADAP Pengereman DINAMIK MOTOR INDUKSI TIGA PHASA ROTOR BELITAN (APLIKASI PADA PUSAT PENGEMBANGAN DAN PEMBERDAYAAN PENDIDIK DAN TENAGA KEPENDIDIKAN (P4TK) MEDAN)

Fauzan Z Nasution, Eddy Warman

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)

Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA

e-mail: yang_ikhlas_silahkan.masuk@yahoo.com, surya_et@yahoo.com

ABSTRAK

Pengereman dinamik motor induksi tiga fasa rotor belitan dapat dilakukan dengan sistem pengereman mekanis dan elektrodinamik. Pada sistem elektrodinamik dapat dibedakan atas beberapa metode diantaranya pengereman regeneratif, *plugging* dan dinamik. Pada metode dinamik dapat menggunakan sumber arus searah atau kapasitor. Pada motor induksi tiga fasa terkadang batangan yang rusak pada cangkang rotor dapat menyebabkan belitan motor yang tak seimbang, dan juga belitan pada rotor dapat dilengkapi dengan resistansi eksternal tiga fasa yang mungkin belum seimbang. Hal ini memberikan pengaruh terhadap torsi dan putaran motor tersebut. Penelitian pengaruh tahanan rotor tak seimbang terhadap pengereman dinamik motor induksi tiga fasa rotor belitan ini, menggunakan kapasitor minimum 17,35 μF untuk motor dengan kapasitas 1,1 KW dan faktor daya 0,71. Tahanan yang digunakan masing – masing 20 Ω dengan tahanan tak seimbang konfigurasi 26,4 Ω , 31,3 Ω , 37,7 Ω . Waktu tercepat pengereman diperoleh sebesar 3,69 detik dan waktu terlama pengereman diperoleh sebesar 3,95 detik.

Kata Kunci: Tahanan, pengereman dinamik, motor induksi

1. Pendahuluan

Dewasa ini pada umumnya industri memerlukan motor sebagai penggerak, adapun motor yang sering digunakan adalah motor induksi, karena konstruksinya yang sederhana, kuat dan lebih murah jika dibandingkan dengan motor jenis lain. Pada suatu kondisi tertentu motor harus dapat diberhentikan segera. Beberapa aplikasi motor yang memerlukan pengereman misalnya : kereta api, kereta rel listrik, conveyor, katrol dan lain-lain [1].

Pada motor induksi tiga fasa, ada 2 jenis rotor yang digunakan yaitu rotor sangkar dan rotor belitan. Pada rotor belitannya dapat dilengkapi dengan resistansi eksternal tiga fasa. Resistansi eksternal tiga fasa yang terpasang di rotor dimungkinkan belum seimbang. Hal ini memberikan pengaruh terhadap torsi dan putaran motor tersebut. Begitu

juga pada statornya, dalam proses pengereman dinamik ini rangkaian stator dihubungkan dengan kapasitor, maka akan timbul arus penguatan sehingga membangkitkan kopel yang berlawanan arah dengan putaran rotor, dengan demikian akan mempengaruhi proses pengereman sampai berakhirnya proses pengereman.

Setelah proses penguatan sendiri berakhir, tegangan dan arus penguatan akan turun cepat karena pengaruh resistansi dan tegangan induksi yang relatif semakin kecil [2].

Pengereman tidak terbatas untuk menghentikan perputaran mesin secara cepat tetapi juga untuk menjaga agar perputaran mesin tidak melebihi putaran yang diizinkan. Sehingga pengereman merupakan suatu kerja dari gaya yang menghasilkan perlambatan atau penghentian.

2. Motor Induksi Tiga Phasa

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (rotating magnetic field) yang dihasilkan arus stator [3].

Motor induksi tiga phasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak berkisar dari 0,4 mm samapi 4 mm [4,8].

3. Metode Komponen Simetris

Jika ada suatu rangkaian tiga phasa yang mempunyai tahanan yang tidak seimbang maka akan timbul komponen simetris pada rangkaian itu. Maka akan ada komponen simetris pada rangkaian rotor diatas yang besarnya ditunjukkan pada persamaan 1, 2 dan 3 dibawah ini [5]:

$$I_{ar0} = \frac{1}{3} (I_{ar} + I_{br} + I_{cr}) \quad (1)$$

$$I_{ar0} = \frac{1}{3} (I_{ar} + aI_{br} + a^2I_{cr}) \quad (2)$$

$$I_{ar0} = \frac{1}{3} (I_{ar} + a^2I_{br} + aI_{cr}) \quad (3)$$

Dari Persamaan diatas maka didapat besar arus di rotor (I_2) untuk urutan positif (I_{21}) dan urutan negatif (I_{22}), dan juga didapatkan tegangan di rotor (V_2) seperti persamaan 4 sebesar:

$$V_{ar} = -Z_{ar}I_{ar}; V_{br} = -Z_{br}I_{br}; V_{cr} = -Z_{cr}I_{cr} \quad (4)$$

Pada pendekatan pertama, semua arus rotor mempunyai frekuensi $f_2 = Sf_1$ pada keadaan *steady state* (tetap). Gaya gerak magnet maju, dihasilkan oleh I_{ar1} , I_{br1} , I_{cr1} , berinteraksi seperti biasa dengan belitan. Seperti persamaan 5, 6 dan 7 dibawah ini.

$$I_{21}R_2 - V_{21} = -j \omega_1 S \psi_{21}; \psi_{21} = L_2 I_{21} + L_m I_{11} \quad (5)$$

$$I_{11}R_1 - V_{11} = -j \omega_1 \psi_{11}; \psi_{11} = L_1 I_{11} + L_m I_{21} \quad (6)$$

$$I_{11} = \frac{-j \omega_1 L_m I_{21} + V_s}{R_1 + j \omega_1 L_1} \quad (7)$$

Komponen gaya gerak magnet yang mundur dari arus rotor yang berputar terhadap stator terdapat

pada kecepatan n_1' . Adapun n_1' seperti persamaan 8 berikut ini [6]:

$$n_1' = n - S \frac{f_1}{p} = \frac{f_1}{p} (1 - 2S) \quad (8)$$

Maka ini akan menginduksi gaya gerak listrik pada frekuensi $f_1 = f_1(1 - 2S)$. Gaya gerak mundur dihasilkan oleh I_{22} , yang akan menghasilkan torsi lawan, seperti yang ditunjukkan persamaan 9, 10 dan 11 dibawah ini:

$$I_{22}R_2 - V_{22} = -j \omega_1 S \psi_{22}; \psi_{22} = L_{22}I_{22} + L_m I_{12} \quad (9)$$

$$I_{12}R_1 = -j \omega_1 (1 - 2S) \psi_{12}; \psi_{12} = L_1 I_{12} + L_m I_{22} \quad (10)$$

$$I_{12} = \frac{-j \omega_1 (1 - 2S) L_m I_{22}}{R_1 + j \omega_1 (1 - 2S) L_1} \quad (11)$$

Adapun L_1 seperti ditunjukkan persamaan 12 berikut ini:

$$L_1 = L_s + L_m; L_2 = L_r + L_m \quad (12)$$

Diketahui torsi seperti persamaan 13 berikut ini:

$$T_e = \frac{Pg}{\omega_s}; \omega_s = \frac{\omega_1}{p_1} \left(\frac{Rad}{s} \right) = \frac{3p_1 I_2^2 R_2}{\omega_1 S} \quad (13)$$

Dari persamaan 13 di atas, apabila rotor dihubung singkat maka tegangan di rotor (V_2) = 0, maka akan menjadi seperti persamaan 14 berikut ini:

$$I_{21}R_2 = -j \omega_1 S \psi_{21} \quad (14)$$

Dengan menambahkan I_{21}^* ke persamaan 14 di atas maka:

$$I_{21}^* I_{21} R_2 = -j \omega_1 S \psi_{21} I_{21}^* \quad (15)$$

Dengan menggabungkan bilangan real dan imajiner bilangan pada persamaan 15 di atas didapat persamaan:

$$I_{21}^* I_{21} R_2 + j \omega_1 S \psi_{21} I_{21}^* \quad (16)$$

Maka P_g adalah:

$$\text{Real} = 3(I_{21}^* I_{21} R_2)$$

$$\text{Imagine} = 3j \omega_1 S \psi_{21} I_{21}^* \quad (17)$$

Substitusikan persamaan 13 ke persamaan 18 berikut ini, maka didapat:

$$T_e = P_1 \text{Imag}[(L_2 I_{21} + L_m I_{11}) I_{21}^*]$$

$$= 3P_1 \text{Imag}(L_m I_{11} I_{21}^*)$$

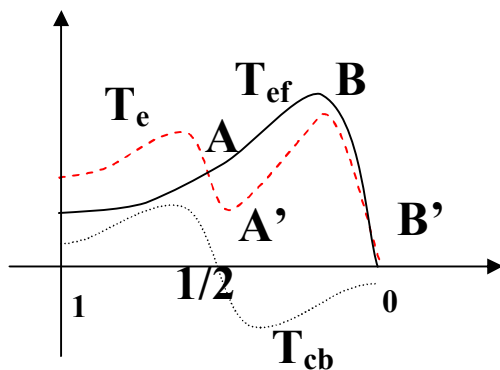
$$= 3P_1 \text{Imag} (I_{11}I_{21}^*) \quad (18)$$

Persamaan 18 di atas juga berlaku untuk persamaan 9 yang menghasilkan torsi lawan. Maka ekspresi torsi adalah [6]:

$$\begin{aligned} T_e &= 3P_1 L_m [\text{Image} (I_{11}I_{21}^*) + \text{Image} (I_{12}I_{22}^*)] \\ &= T_{e1} + T_{e2} \end{aligned} \quad (19)$$

Dimana torsi adalah penjumlahan dari maju (T_{e1}) dan torsi mundur (T_{e2}).

Untuk T_{e1} menggunakan komponen simetris urutan "1" dan untuk T_{e2} memakai komponen simetris urutan "2". Seperti pada gambar 1 berikut [6].



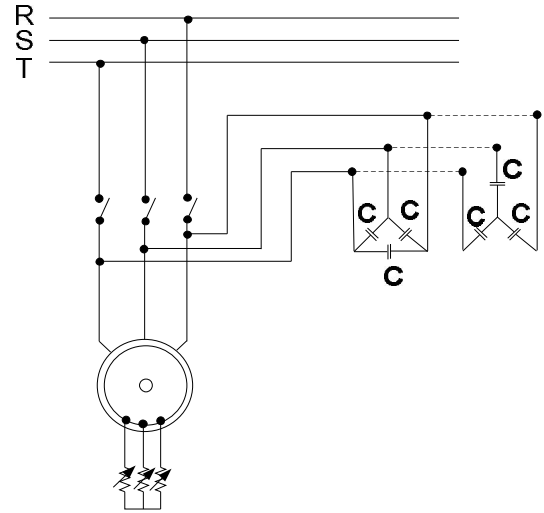
Gambar 1. Kurva Torsi terhadap slip

Komponen torsi mundur adalah positif (motoring) dari $1-2S < 0$ atau $S > 0,5$ dan negatif (*breaking*) pada $S < 0,5$. Pada permulaan, torsi komponen mundur akan bergerak (motoring). Dan juga untuk $S = 0,5$, torsi balik adalah 0, karena induksi gaya gerak listrik untuk keadaan ini berada pada frekuensi $f_1' = f_1(1-2S)$, jika $S = 0$, maka $f_1' = 0$ dan tidak terjadi induksi pada keadaan ini. Torsi balik ini juga disebut dengan torsi George atau monoksial [6].

4. Pengereman Dinamik Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Pengereman dinamik merupakan sistem pengereman dengan menggunakan kapasitor sebagai rangkaian penguat dimana arus yang ditimbulkan oleh penguatan sendiri mengalir dalam mesin tanpa adanya sumber daya dari luar, melainkan energi yang tersisa dari rotor yang diubah menjadi energi listrik.

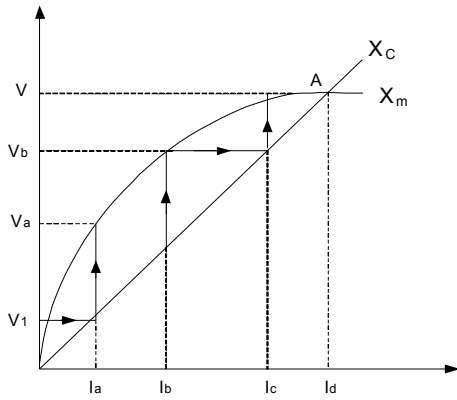
Prinsip kerja pengereman ini dimulai dengan melepaskan motor dari jala-jala dan menghubungkan stator secara paralel dengan kapasitor yang dirangkai secara delta ataupun secara bintang seperti gambar 2 [7] berikut ini.



Gambar 2. Hubungan Kapasitor Sebagai Penguatan yang Dapat Dihubungkan Delta atau Bintang.

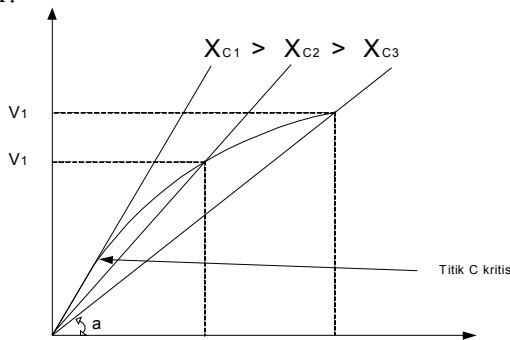
Sesaat sumber dilepaskan dari belitan stator, kapasitor penguat akan masuk, dengan demikian medan putar yang tadinya ditimbulkan jala-jala tiga fasa akan hilang, walaupun demikian rotor masih berputar akibat kerja energi kinetis yang masih tetap dimiliki rotor. Pada awalnya ada fluksi remanensi (setelah sumber dilepas) yang akan membentuk tegangan imbas yang kecil di rotor. Pada sisi stator tempat kapasitor, akan dibangkitkan tegangan bolak-balik yang merupakan penjumlahan tegangan stator yang mula-mula sebesar tegangan jala-jala, dengan tegangan yang diinduksikan dari sisi rotor. Tegangan bolak-balik ini akan membangkitkan arus penguat untuk mengisi kapasitor hingga diperoleh keseimbangan antara reaktansi kapasitif dengan reaktansi magnet mesin ($X_m = X_c$) [7].

Berikut akan digambarkan timbulnya proses penguatan sendiri yang mengalirkan arus penguat untuk membangkitkan kopel rem seperti gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Karakteristik hubungan antara arus penguatan dengan tegangan [8,9].

Bila harga kapasitor (C) diubah-ubah, maka kemiringan dari garis X_c akan berubah-ubah pula sehingga diperoleh operating point yang berbeda-beda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 4. Makin besar harga C, sudut α makin besar.

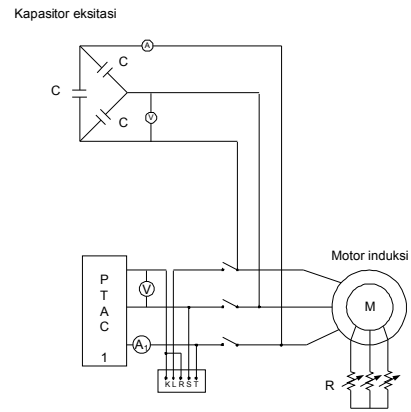


Gambar 4. Kurva hilai kapasitansi terhadap pembangkitan tegangan [8,9].

5. Pengaruh Tahanan Rotor Tak Seimbang Terhadap Pengereman Motor Induksi

Untuk melihat pengaruh tahanan rotor tak seimbang terhadap pengereman dinamik motor induksi tiga fase rotor belitan, dilakukan percobaan pengereman dinamik dengan tahanan rotor tak seimbang.

Berikut gambar rangkaian percobaan yang dilakukan di Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan (P4TK) Medan seperti yang ditunjukkan gambar 5 berikut.



Gambar 5. Rangkaian percobaan Pengereman dinamik Motor Induksi tiga fase dengan tahanan rotor tak seimbang

Dari percobaan yang dilakukan diperoleh data-data seperti tabel 1, tabel 2 dan tabel 3 berikut:

$$V_{L-L} = 380 \text{ Volt}, C = 30 \mu F,$$

Tabel 1. Data hasil percobaan pengereman tanpa kapasitor

V (volt)	I (Ampere)	P (Watt)	Nr	t (s)
368	2	235	1493	5,13

Tabel 2. Data hasil percobaan pengereman dengan tahanan rotor seimbang

R (Ω)	Nr	Pin	Ia	Ib	Ic	I (A)	Ikapasitor	t (s)
20	1443	263	0,49	0,49	0,49	4,25	6,5	3,55

Tabel 3. Data hasil percobaan pengereman dengan tahanan rotor tak seimbang

R (Ω)	Nr	Pin	Ia	Ib	Ic	I	Ikapasitor	t (s)
26,4	1426	247	0,34	0,54	0,54	4,30	6,5	3,69
31,3	1415	246	0,28	0,58	0,58	4,24	6,5	3,80
37,7	1390	246	0,20	0,72	0,72	4,20	6,5	3,95

6. Analisa Perhitungan

Kebutuhan kapasitor minimum agar pada saat pengereman terbangkit tegangan di stator adalah:

$$X_m = X_c - X_1 \tag{20}$$

$$\begin{aligned} X_c &= X_m + X_l \\ &= 93,69 + 12,31 \\ &= 106 \Omega \end{aligned}$$

Dimana:

$$X_c = \frac{1}{\sqrt{3} 2\pi f c} \text{ maka:}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{3} 2\pi \cdot 50 \cdot 106}$$

$$= 17,35 \mu\text{F}$$

Kapasitor yang digunakan pada percobaan pengereman adalah 30 μF per fasa dengan hubungan delta (Δ).

Untuk nilai kapasitor 30 μF per fasa, reaktansi kapasitifnya adalah:

$$X_c = \frac{1}{\sqrt{3} \omega C} = 61,289 \Omega$$

Pengereman berlangsung pada saat reaktansi kapasitif (X_c) sama dengan reaktansi magnetis motor (X_m), maka :

$$X_m = X_c - X_l = 61,289 - 12,31 = 48,979 \Omega$$

Berdasarkan tabel 2 dan tabel 3 di atas di dapat nilai torsi sebagai berikut:

- a. Untuk data $R_a = 20\Omega$, $R_b = 20\Omega$, $R_c = 20\Omega$, $\text{Slip} = 0,038$ maka torsi pengereman dinamik yang dibangkitkan (T_{db}) adalah:

$$T_{db} = \frac{3}{\omega_s} \cdot (I_2)^2 \cdot \frac{R_2}{(1-s)} = 0,101 \text{ NM}$$

- b. Untuk data $R_a=26,4\Omega$, $R_b=20\Omega$, $R_c=20\Omega$, $\text{Slip} = 0,049$ maka ekspresi torsi (T_e) yang dibangkitkan adalah:

$$\begin{aligned} T_e &= 3 P1Lm[\text{Image}(I_{11}I_{21}^*) + \\ &\quad (\text{Image}(I_{12}I_{22}^*))] = T_{e1} + T_{e2} \\ &= 3 \times 2 \times 0,298[\text{Image}(1,999 \times 0,0667 \angle - \\ &\quad 83,14 - 180) + \\ &\quad \text{Image}(0,0586 \times 0,0667 \angle 5,74 - 180)] \\ &= 0,236 - 0,00069 \text{ NM} \\ &= 0,235 \text{ NM} \end{aligned}$$

maka torsi maju (urutan 1) T_{e1} sebesar 0,236 NM dan torsi mundur (urutan 2) T_{e2} sebesar 0,00069 NM.

- c. Untuk data $R_a = 31,3\Omega$, $R_b = 20\Omega$, $R_c = 20\Omega$, $\text{Slip} = 0,057$ maka ekspresi torsi (T_e) yang dibangkitkan adalah:

$$\begin{aligned} T_e &= 3 P1Lm[\text{Image}(I_{11}I_{21}^*) + \\ &\quad (\text{Image}(I_{12}I_{22}^*))] = T_{e1} + T_{e2} \\ &= 3 \times 2 \times 0,298[\text{Image}(2,0004 \times 0,1 \angle - \\ &\quad 82,3 - 180) + \\ &\quad \text{Image}(0,088 \times 0,1 \angle 5,85 - 180)] \\ &= 0,354 - 0,0016 \text{ NM} \\ &= 0,3524 \text{ NM} \end{aligned}$$

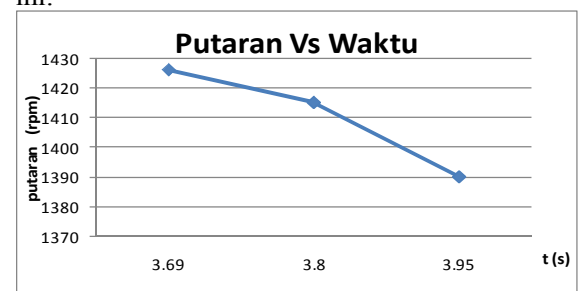
maka torsi maju (urutan 1) $T_{e1} = 0,354 \text{ NM}$ dan torsi mundur (urutan 2) $T_{e2} = 0,0016 \text{ NM}$.

- d. Untuk data $R_a = 37,7\Omega$, $R_b = 20\Omega$, $R_c = 20\Omega$, $\text{Slip} = 0,073$ maka ekspresi torsi (T_e) yang dibangkitkan adalah:

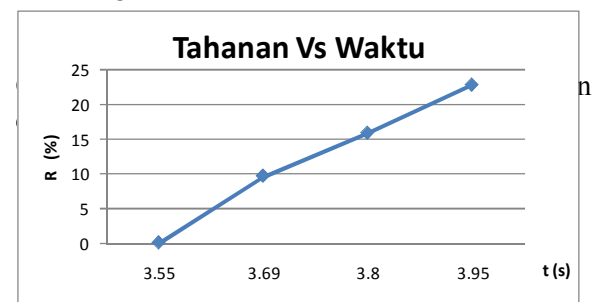
$$\begin{aligned} T_e &= 3 P1Lm[\text{Image}(I_{11}I_{21}^*) + \\ &\quad (\text{Image}(I_{12}I_{22}^*))] = T_{e1} + T_{e2} \\ &= 3 \times 2 \times 0,298[\text{Image}(2,004 \times 0,173 \angle - \\ &\quad 80,46 - 180) + \\ &\quad \text{Image}(0,152 \times 0,173 \angle 6,06 - 180)] \\ &= 0,612 - 0,0049 \text{ NM} \\ &= 0,607 \text{ NM} \end{aligned}$$

maka torsi maju (urutan 1) T_{e1} sebesar 0,612 NM dan torsi mundur (urutan 2) T_{e2} sebesar 0,0049 NM.

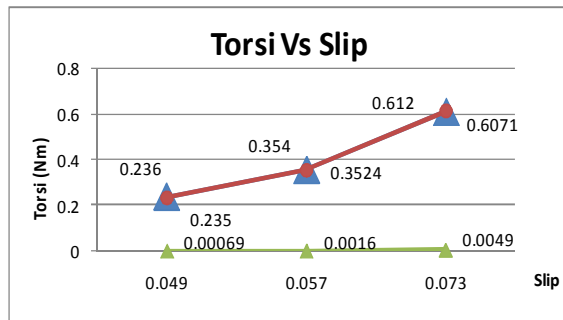
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh grafik 1, grafik 2 dan grafik 3 berikut ini:



Grafik 1. Grafik karakteristik pengereman dinamik N_r (rpm) Vs t (s) pada tahanan rotor tak seimbang



Grafik 2. Grafik karakteristik pengereman dinamik tahanan (R) Vs waktu (s) pada tahanan rotor tak seimbang



Grafik 3. Grafik karakteristik pengereman dinamik Torsi Vs Slip

7. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengereman dinamik motor induksi rotor belitan dengan kapasitor, kapasitor minimum agar terjadi pengereman adalah $17,35 \mu F$ untuk motor dengan kapasitas 1,1 KW dan faktor daya 0,71.
2. Waktu pengereman dinamik motor induksi dengan tahanan rotor tak seimbang, semakin besar nilai tahanan tak seimbangnya, makin lama waktu pengeremannya. Tahanan tak seimbang yang dipakai masing-masing nilainya $26,4\Omega$, $31,3\Omega$, $37,7\Omega$.
3. Tahanan rotor yang tak seimbang memiliki waktu pengereman tercepat sebesar 3,69s pada tahanan dengan konfigurasi $26,4\Omega$, 20Ω , 20Ω .
4. Pada saat penambahan nilai tahanan $> 37,7\Omega$ mesin mengalami hentakan yang sangat kuat sehingga penambahan nilai tahanan dikhawatirkan bisa membuat kerusakan pada motor.

8. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Drs. Rosehat Nasution dan Elmi Zuhriah Hasibuan selaku orang tua penulis, Ir. Eddy Warman selaku dosen pembimbing, juga Ir. Panusur S.M.L Tobing, Ir. Surya Tarmizi Kasim, M.Si dan Ir. Zulkarnaen Pane selaku dosen penguji penulis yang sudah membantu penulis dalam menyelesaikan paper ini, serta teman-teman penulis yang sudah memberikan dukungan selama pembuatan paper ini.

9. Daftar Pustaka

- [1]. Agung Warsito, Mochammad Facta, M Anantha B.P, "Pengereman Dinamik Pada Motor Induksi Tiga Fasa". Jurnal Transmisi, Vol II no. 1, hal 15, Juni 2006.
- [2]. Subramanian, R, "A Fast Method Of Braking Of Induction Motor By Self Excitation", International Electrical Engineering Education (IEEE), vol 7, no.2, hal 315-321, Juni 1992.
- [3]. Chapman Stephen J, "Electric Machinery Fundamentals", Third edition, New York: McGraw-Hill Companies, 1999.
- [4]. Fitzgerald, AE, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Mesin-mesin Listrik", Edisi ke empat, Erlangga, Jakarta, 1984.
- [5]. Stevenson, William d, jr, "Analisa Sistem Tenaga Listrik", edisi ke empat, Penerbit Erlangga, Jakarta 1990.
- [6]. Boldea Ion, Nasar syed A "Induction Machines Handbooks" Washington DC 2001
- [7]. Jin, Zhang, Wang Xiuzhen, Huang Yu, "Establish og for dynamic Braking", International Electrical Engineering Education (IEEE), Hal 3196-3198
- [8]. Wijaya, Mochtar, "Dasar-dasar Mesin Listrik", Jakarta: Djambatan 2001.
- [9]. Zuhul, "Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya" Edisi ke lima, Penerbit Gramedia, Jakarta, 1995.