

PENGARUH RESISTANSI DI STATOR TERHADAP PUTARAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA SANGKAR TUPAI DENGAN KENDALI TORSI LANGSUNG MENGGUNAKAN PI

Vector Anggit Pratomo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Pancasila
Jl. Srengseng Sawah
e-mail: vector_anggit@yahoo.com

Abstract– The Three-phase induction motor squirrel cage has a characteristic change in the event of a change in temperature beyond the work of the motor, which leads to changes in the stator with the resistance value affects the performance of the rotational speed of the motor, the motor rotation speed changes are influenced by the amount flux generated by the flow of resistance is stator.

This thesis aims to monitoring the motor rotation speed a characteristic three phase squirrel cage induction againts shift in the stator resistance value using a PI controller with a sensor of the motor speed in which the reference modeling is used motor stator current and stator flux. Approach using the resistance change of approach to equality of the number of turns in each phase in the stator. Use of Direct Torque Control (DTC) method because the process of the motor speed is determined by the stator flux, torque, and position the sector to determine the input of inverter switching obtained from the Lookup Table. The value of resistance in flux estimation gives the value of the flux hysteresis band against actual performance.

Key Words– stator resistance, induction motor, direct torque control , the controller PI

Abstrak – Motor induksi tiga fasa sangkar tupai memiliki perubahan karakteristik jika terjadi perubahan pada temperature diluar batas kerja dari motor, yang menyebabkan terjadinya perubahan nilai resistansi di stator sehingga mempengaruhi dari unjuk kerja kecepatan putar motor, perubahan kecepatan putar motor disebabkan oleh besarn fluks yang dibangkitkan arus terhadap resistansi yang berada distator.

Tesis ini bertujuan untuk memperhatikan karakteristi kecepatan putaran motor induksi tiga fasa sangkar tupai terhadap perubahan nilai resistansi di stator menggunakan pengendali PI dengan sensor dari kecepatan motor dimana acuan pemodelan motor yang digunakan adalah arus stator dan fluks stator. Pendekatan perubahan resistansi menggunakan pendekatan persamaan dari jumlah belitan di setiap fasa pada stator. Penggunaan metode Kendali Torsi Langsung (KTL) dikarenakan proses dari kecepatan motor ditentukan oleh fluks stator, torsi, dan posisi sektor untuk menentukan masukan dari *switching inverter* yang diperoleh dari *Lookup Table*. Nilai resistansi pada fluks estimasi memberikan nilai *hysteresis band* terhadap performa fluks actual.

Kata Kunci– Resistansi stator, motor induksi, Kendali Torsi Langsung, Pengendali PI

I. PENDAHULUAN

Mesin-mesin produksi di dunia industri banyak menggunakan motor induksi, dan dapat diketahui bahwa yang sering terjadi pada motor induksi adalah induktansi hubungan antar fasa, pengaruh ketidak seimbangan dari tegangan masukan dan karakteristk yang tidak ideal untuk motor induksi dengan pengaruh kedalam varian pada beban, ketidak setimbangan pada rotor dan temperature yang dihasilkan, sehinga menyebabkan kesalahan kecepatan motor yang disebabkan oleh fluks magnetik stator dikarenakan beberapa jumlah belitan pada stator menjadi terhubung singkat atau dinamakan *inter turn short circuit* membuat resistansi pada stator berubah terutama ketika temperatur pada motor meningkat[1].

Metode Kendali Torsi Langsung (*Direct Torque Control*) yang pertama kali diperkenalkan oleh I . Takashi dan T. Noguci serta Depenbrock akan digunakan sebagai sistem pengendalian motor induksi dengan sumber tegangan inverter[2-3]. Metode ini memungkinkan pengendalian langsung terhadap torsi dan fluks motor induksi dengan cara

melakukan pemilihan vektor tegangan. Pemilihan vektor tegangan dilakukan untuk membatasi torsi dan fluks untuk tetap berada didalam *hysteresis band* dan untuk mendapatkan respon torsi yang sangat cepat.

Pemodelan pada motor induksi dengan jumlah belitan pada setiap fasa di stator akan digunakan untuk melihat performa dari torsi ,fluks, arus dan masukan tegangan motor induksi dengan Kendali Torsi Langsung dikarenakan memiliki hubungan dengan pengaruh *resistansi* stator sebagai pembangkit fluks.

Pada penelitian ini dirancang suatu pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan sensor menggunakan metode PI untuk mendapatkan respon performa kecepatan motor, dengan adanya pengaturan kecepatan ini diharapkan mendapatkan kecepatan motor yang diinginkan jika terjadi perubahan resistansi di stator pada motor induksi tiga fasa sangkar tupai.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini metodologi penelitian yang dilakukan adalah:

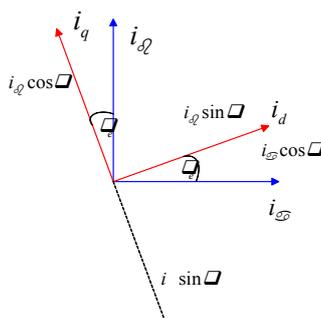
1. Melakukan studi *literature* dengan mencari dan mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan motor induksi tiga fasa sangkar tupai, Kendali Torsi Langsung dan pengendali PI
2. Membuat pemodelan dari motor induksi tiga fasa sangkar tupai terhadap sumbu qd dengan *transformasi park*.
3. Membuat pemodelan perubahan resistansi pada stator terhadap sumbu qd dengan *transformasi park*.
4. Mengabungkan persamaan model motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan persamaan perubahan resistansi pada stator yang sudah berada pada sumbu qd
5. Membuat *state space* dari persamaan model motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan nilai perubahan resistansi distator.
6. Merancang pengendalian motor dengan KTL menggunakan pengendali PI.
7. Melihat kinerja karakteristik motor induksi tiga fasa sangkar tupai dengan KTL menggunakan pengendali PI.

III. PEMBAHASAN

3.1 Pemodelan Motor Induksi Tiga fasa

Sangkar Tupai pada sumbu qd

Motor induksi yang digunakan dalam simulasi ini adalah motor induksi tiga fasa berkekuatan 2HP. Untuk mempermudah analisa dan perhitungan maka digunakan suatu metoda yang akan mengubah arus, fluks, dan tegangan tiga fasa ke bentuk dua fasa. Metode untuk melakukan tranformasi tiga fasa ke bentuk dua fasa diam adalah transformasi Clarke, selanjutnya akan ditransformasikan lagi ke bentuk dua fasa berputar dengan transformasi park ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Transformasi dua fasa diam ke dua fasa berputar (*rotating*)

Pemodelan motor induksi tiga fasa kerangka acuan qd dilakukan berdasarkan kerangka acuan stator dengan parameter model yang digunakan adalah dengan arus stator dan fluks stator. Karena kerangka acuan yang digunakan adalah kerangka acuan stator, maka nilai kecepatan sinkron stator $\omega=0$. Sehingga didapatkan model motor dalam kerangka acua qd adalah:

$$\frac{d}{dt} i_q^s = -\frac{r^s}{L^s} i_q^s - \left(\frac{r^s L^r + r^r L^s}{L^s L^r - L^m} \right) i_q^s + \frac{L^r}{L^s L^r - L^m} V_q^s - \left(\frac{L^r L^s - L^m}{L^s L^r - L^m} \right) \omega_r i_d^s - \frac{L^r}{L^s L^r - L^m} \omega_r \lambda_d^s \quad (3.1)$$

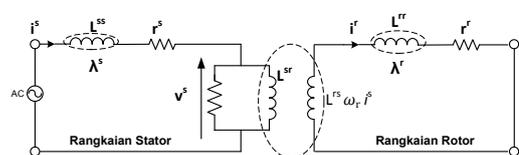
$$\frac{d}{dt} i_d^s = \frac{r^s}{L^s} i_d^s - \left(\frac{r^s L^r + r^r L^s}{L^s L^r - L^m} \right) i_d^s + \frac{L^r}{L^s L^r - L^m} V_d^s - \left(\frac{L^r L^s - L^m}{L^s L^r - L^m} \right) \omega_r i_q^s - \frac{L^r}{L^s L^r - L^m} \omega_r \lambda_q^s \quad (3.2)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r^r i_q^s + V_q^s \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r^r i_d^s + V_d^s \quad (3.4)$$

3.2 Pemodelan jumlah Belitan stator pada sumbu qd

Dengan dasar rangkaian ekivalent dari mesin asinkron yang ditunjukkan pada Gambar 2 [6], rangkaian dari motor induksi dapat dijabarkan oleh sebuah sistem, dimana motor tiga fasa dari stator dan rotor disajikan kedalam vektor.



Gambar 2. Rangkaian ekivalent motor induksi

Model untuk *asymmetrical* motor induksi tiga fasa dapat diketahui dari ruang vektor motor induksi pada putaran rotor yang disebabkan oleh garis fluks dari stator [7-10]. Untuk memperoleh persamaan dari asimetris belitan stator dan rotor, telah dibuat sebuah asumsi sebagai berikut:

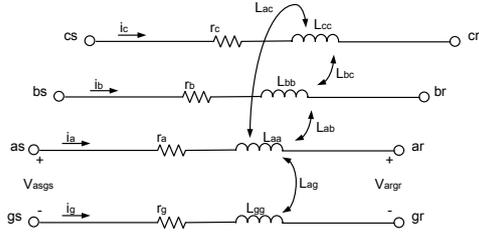
- Setiap fasa pada stator dari motor telah memiliki putaran yang berbeda, tapi penempatan kekhususannya telah ditentukan.
- Magnetic saturasi tidak disajikan.

Sesuai dengan symbol as, bs, cs, ar, br, dan cr, persamaan untuk tegangan dari magnetis

pengabungan stator dan rangkaian rotor dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_{abc}^s = r_{abc}^s i_{abc}^s + p \lambda_{abc}^s \quad (3.5)$$

$$0 = r_{abc}^r i_{abc}^r + p \lambda_{abc}^r \quad (3.6)$$



Gambar 3. Rangkaian RL 3 fase dengan ground

Model belitan motor pada stator merupakan rangkaian ekuivalent yang terhubung dengan RL seri, dimana pendekatannya biasanya digunakan untuk hal tertentu dari rangkaian tiga fase [11-12] ditunjukkan pada Gambar 3 dapat dituliskan persamaan

$$V_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} i_s + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{sa}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{sb}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{sc}}{dt} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\lambda_s = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix} i_s + \begin{bmatrix} L_{asr} \\ L_{bsr} \\ L_{csr} \end{bmatrix} i_r \quad (3.6)$$

$$r_{qd}^s = \begin{bmatrix} r_{11}^s & r_{12}^s & r_{13}^s \\ r_{21}^s & r_{22}^s & r_{23}^s \\ r_{31}^s & r_{32}^s & r_{33}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$r_{11}^s = \frac{2}{3} \left(r_{as} + \frac{1}{4} r_{bs} + \frac{1}{4} r_{cs} \right) \quad (3.8)$$

$$r_{12}^s = \frac{\sqrt{3}}{6} (r_{bs} - r_{cs}) \quad (3.9)$$

$$r_{13}^s = \frac{1}{3} (2r_{as} - r_{bs} - r_{cs}) \quad (3.10)$$

$$r_{22}^s = \frac{1}{2} (r_{bs} + r_{cs}) \quad (3.11)$$

$$r_{33}^s = \frac{1}{3} (2r_{as} + r_{bs} + r_{cs}) \quad (3.12)$$

$$r_{21}^s = r_{12}^s, r_{23}^s = -\frac{1}{2} r_{12}^s \quad (3.13)$$

$$r_{31}^s = -\frac{1}{2} r_{12}^s \text{ dan } r_{32}^s = -r_{12}^s \quad (3.14)$$

Dengan

$$r_{as} = \frac{N_a}{N_s} r_s, r_{bs} = \frac{N_b}{N_s} r_s, \text{ dan } r_{cs} = \frac{N_c}{N_s} r_s, \quad N_a = N_b = N_c = N_s \quad (3.15)$$

$$r_{dq0}^r = r_r I_{3 \times 3} \quad (3.16)$$

N_a, N_b, N_c jumlah belitan pada Phasa A, Phasa B, dan Phasa C

Dalam notasi matriks, arah *flux* dari belitan stator dan rotor dapat dituliskan kedalam bagian dari belitan induktansi dan arus sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a^s \\ \lambda_b^s \\ \lambda_c^s \\ \lambda_a^r \\ \lambda_b^r \\ \lambda_c^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}^{ss} & L_{ab}^{ss} & L_{ac}^{ss} & L_{aa}^{sr} & L_{ab}^{sr} & L_{ac}^{sr} \\ L_{ba}^{ss} & L_{bb}^{ss} & L_{bc}^{ss} & L_{ba}^{sr} & L_{bb}^{sr} & L_{bc}^{sr} \\ L_{ca}^{ss} & L_{cb}^{ss} & L_{cc}^{ss} & L_{ca}^{sr} & L_{cb}^{sr} & L_{cc}^{sr} \\ L_{aa}^{rs} & L_{ab}^{rs} & L_{ac}^{rs} & L_{aa}^{rr} & L_{ab}^{rr} & L_{ac}^{rr} \\ L_{ba}^{rs} & L_{bb}^{rs} & L_{bc}^{rs} & L_{ba}^{rr} & L_{bb}^{rr} & L_{bc}^{rr} \\ L_{ca}^{rs} & L_{cb}^{rs} & L_{cc}^{rs} & L_{ca}^{rr} & L_{cb}^{rr} & L_{cc}^{rr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \\ i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Dengan induktansi stator dan rotor adalah

$$L_{abc}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$L_{abc}^{rr} = \begin{bmatrix} L_{arar} & L_{arbr} & L_{arcr} \\ L_{brar} & L_{brbr} & L_{brcr} \\ L_{crar} & L_{crbr} & L_{cr cr} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dikarenakan simetris, hubungan antar induktansi $L_{asbs} = L_{bscs}, L_{ascs} = L_{csas}$ dan $L_{bscs} = L_{csas}$ sama dengan rotor pada hubungan induktansi dimana

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr} \text{ dan } L_{arbr} = L_{arcr} = L_{brar} = L_{brcr} = L_{crar} = L_{crbr}$$

Hubungan induktansi antara stator ke rotor pada sudut rotor (orientasi mengacu pada stator) maka diperoleh persamaan

$$L_{abc}^{sr} = \begin{bmatrix} L_{asr} \cos \theta & L_{asr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{asr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{bsr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{bsr} \cos \theta & L_{bsr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{csr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{csr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{csr} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dan $L_{abc}^{rs} = L_{abc}^{sr}$ dimana (') merupakan transpose dari matriks. Koefisien untuk

$L_{as ar}, L_{as br}, L_{as cr}, L_{bs ar}, L_{bs br}, L_{bs cr},$ dan $L_{cs ar}, L_{cs br}, L_{cs cr}$ merupakan nilai hubungan induksi dari stator ke rotor. Karena simetris dengan rotor $L_{as ar} = L_{as br} = L_{as cr}, L_{bs ar} = L_{bs br} = L_{bs cr}$ dan $L_{cs ar} = L_{cs br} = L_{cs cr}$

Stator dan rotor garis fluks $qd0$ diperoleh dengan menerapkan transformasi dari garis fluks abc stator dan rotor kedalam Persamaan 3.21 maka

$$\lambda_{qdo}^s = \mathbf{L}_{qdo}^{ss} \dot{i}_{qdo}^s + \mathbf{L}_{qdo}^{sy} \dot{i}_{qdo}^r \quad (3.21)$$

$$\lambda_{qdo}^r = \mathbf{L}_{qdo}^{rs} \dot{i}_{qdo}^s + \mathbf{L}_{qdo}^{ry} \dot{i}_{qdo}^r \quad (3.22)$$

Dengan

$$\mathbf{L}_{qdo}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & L_{13}^{ss} \\ L_{21}^{ss} & L_{22}^{ss} & L_{23}^{ss} \\ L_{31}^{ss} & L_{32}^{ss} & L_{33}^{ss} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{L}_{qdo}^{sy} = \begin{bmatrix} L_{11}^{sy} & L_{12}^{sy} & 0 \\ L_{21}^{sy} & L_{22}^{sy} & 0 \\ L_{31}^{sy} & L_{32}^{sy} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{L}_{qdo}^{yy} = \begin{bmatrix} L_{11}^{yy} & 0 & 0 \\ 0 & L_{22}^{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\mathbf{L}_{qdo}^{rs} = \begin{bmatrix} L_{11}^{rs} & L_{12}^{rs} & 0 \\ L_{21}^{rs} & L_{22}^{rs} & -0.5L_{32}^{rs} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Matriks element dari \mathbf{L}_{qdo}^{ss} , \mathbf{L}_{qdo}^{sy} , \mathbf{L}_{qdo}^{yy} dan \mathbf{L}_{qdo}^{rs} terdiri dari:

1. Stator **qdo** dan mutual induktansi, Matriks element dari \mathbf{L}_{qdo}^{ss} yaitu:

$$L_{11}^{ss} = \frac{2}{3}(L_{asa} + .25L_{bsb} + .25L_{csc} - L_{asb} - L_{asc} - .5L_{bsc}) \quad (3.27)$$

$$L_{12}^{ss} = \frac{1}{2\sqrt{3}}(L_{bsb} - L_{csc} + L_{asc}) \quad (3.28)$$

$$L_{13}^{ss} = \frac{2}{3}(L_{asa} - .5L_{bsb} - .5L_{csc} + .5L_{asb} + .5L_{asc} - L_{bsc}) \quad (3.29)$$

$$L_{21}^{ss} = \frac{1}{\sqrt{3}}(.5L_{bsb} - .5L_{csc} - L_{asb} + L_{asc}) \quad (3.30)$$

$$L_{22}^{ss} = \frac{1}{2}(L_{bsb} + L_{csc} - 2L_{bsc}) \quad (3.31)$$

$$L_{23}^{ss} = \frac{1}{\sqrt{3}}(-L_{bsb} + L_{csc} - L_{asb} + L_{asc}) \quad (3.32)$$

$$L_{33}^{ss} = \frac{1}{3}(L_{asa} + L_{bsb} + L_{csc} + 2L_{asb} + 2L_{asc} + 2L_{bsc})$$

$$L_{31}^{ss} = \frac{1}{2}L_{13}^{ss}, \text{ dan } L_{32}^{ss} = \frac{1}{2}L_{23}^{ss} \quad (3.33)$$

dimana

$$N_a = N_b = N_c, N_{asa} = N_{bsb} N_{csc} \text{ dan } N_{asb} = N_{asc} = N_{bsc}$$

2. Stator ke rotor **qdo** dan mutual induktansi, Matriks element dari \mathbf{L}_{qdo}^{sr}

Dikarenakan dari rotor simetris, koefisien dari hubungan induksi stator ke rotor dapat disederhanakan sebagai

$$N_{asa} = N_{asb} = N_{asc} = N_{asr}, N_{bsa} = N_{bsb} = N_{bsc} = N_{bsr}, \text{ dan } N_{csa} = N_{csb} = N_{csr} = N_{csr},$$

dan hasil dari transformasi adalah:

$$L_{11}^{sy} = L_{asr} + .25L_{bsr} + .25L_{csr} \quad (3.34)$$

$$L_{12}^{sy} = \frac{\sqrt{3}}{4}(L_{bsr} - L_{csr}) \quad (3.35)$$

$$L_{22}^{sy} = \frac{3}{4}(L_{bsr} + L_{csr}) \quad (3.36)$$

$$L_{31}^{sy} = .5L_{asr} - .25L_{bsr} - .25L_{csr} \quad (3.37)$$

$$L_{21}^{sy} = L_{12}^{sy}, \text{ dan } L_{32}^{sy} = -L_{12}^{sy}. \quad (3.38)$$

$$L_{asa} = L_{asb} = L_{asc}, L_{bsa} = L_{bsb} = L_{bsc} = L_{csa} = L_{csb} = L_{csr} \quad (3.39)$$

3. Rotor **qdo** dan hubungan induktansi adalah

$$L_{11}^{yy} = L_{22}^{yy} = L_{lr} + \frac{3}{2}L_{mar} = L_{lr} + \frac{N_r^2}{N_s^2}L_m \quad (3.40)$$

$$L_{33}^{yy} = L_{lr} \quad (3.41)$$

Pada dasarnya motor induksi dihubungkan ke dalam masukan tiga fasa oleh tiga kabel yang terhubung. Karenanya, untuk motor induksi sangkar tupai dan hubungan tiga kabel, arus fluks stator dan rotor dibuat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \\ \lambda_q^r \\ \lambda_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & L_{11}^{sy} & L_{12}^{sy} \\ L_{21}^{ss} & L_{22}^{ss} & L_{21}^{sy} & L_{22}^{sy} \\ L_{11}^{sy} & L_{12}^{sy} & L_{11}^{yy} & 0 \\ L_{21}^{sy} & L_{22}^{sy} & 0 & L_{22}^{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ i_q^r \\ i_d^r \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

4. Penentuan Induktansi

Untuk dapat menentukan mesin induksi yang asimetris, sebagai mana fasa pada stator *as, bs dan cs* memiliki jumlah dari putaran belitan yang disimbolkan dengan N_a, N_b dan N_c , dan pada rotor *ar, br dan cr* memiliki putaran belitan yang disimbolkan dengan N_{ar}, N_{br} dan $N_{cr} = N_r$ dan hubungan induksi dapat diketahui untuk mesin asimetris dengan jumlah refrensi dari putaran belitan N_s .

Dengan menggunakan parameter yang diketahui induktansi pada stator untuk tiap fasa *as, bs dan cs* dapat dihitung dengan persamaan

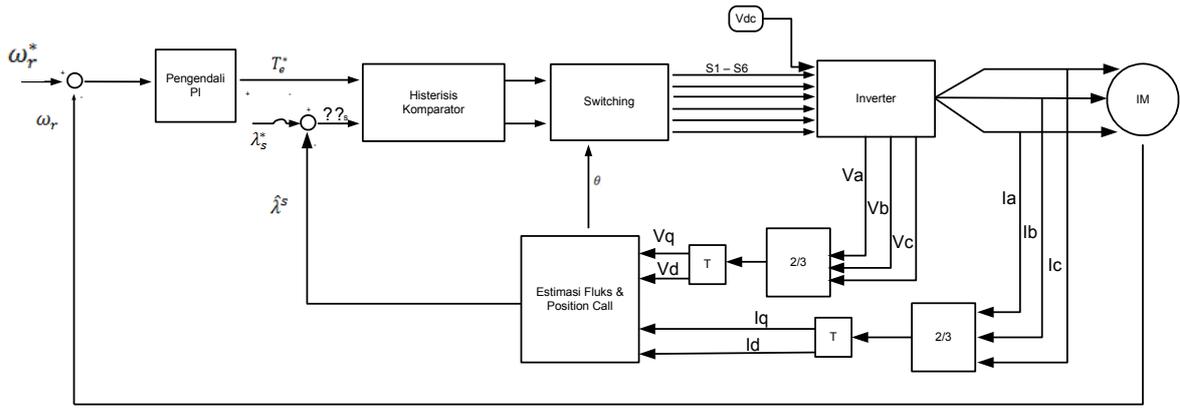
$$L_{asa} = \frac{N_a^2}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3}L_m \right) = N_a^2 L_{mls} \quad (3.43)$$

$$L_{bsb} = N_b^2 L_{mls} \quad (3.44)$$

$$L_{csc} = N_c^2 L_{mls} \quad (3.45)$$

Dengan

$$L_{mls} = \frac{1}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3}L_m \right) \quad (3.46)$$



Gambar 4. Blok diagram pengendali torsi langsung menggunakan pengendali kecepatan dengan metode PI

Induksi pada stator antara fase as dan bs , bs dan cs , cs dan as dapat dikendalikan yaitu

$$L_{asbs} = L_{bsas} = \left(-\frac{1}{2} N_a N_b\right) \left(\frac{2 L_m}{3 N_s^2}\right) = -\frac{1}{3} \frac{N_a N_b}{N_s^2} L_m$$

$$= N_a N_b L_{mss} \quad (3.47)$$

$$L_{ascs} = L_{csas} = N_a N_c L_{mss} \quad (3.48)$$

$$L_{bscs} = L_{csbs} = N_b N_c L_{mss} \quad (3.49)$$

dengan

$$L_{mss} = -\frac{1}{3} \frac{L_m}{N_s^2} \quad (3.50)$$

Induksi rotor dan mutual induktansi rotor dapat diperoleh dengan cara yang sama. Karena rotor diasumsikan simetris, total dari induksi pada fase rotor ar , br dan cr adalah sama, maka

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr} = L_{lr} + \frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m = L_{lr} + L_{mar}$$

$$(3.51)$$

$$L_{mar} = \frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m \quad (3.52)$$

Untuk keadaan yang sama, induktansi mutual pada rotor adalah

$$L_{arbr} = L_{arcr} = L_{brar} = L_{brar} = L_{crar}$$

$$L_{crbr} = -\left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2 N_r^2}{3 N_s^2} L_m\right) = -\frac{1}{2} L_{mar} \quad (3.53)$$

Sebelumnya definisi dari hubungan induktansi stator ke rotor dapat didefinisikan kedalam bagian dari parameter baru. Karena dari rotor simetris (jumlah putaran untuk setiap fase rotor adalah sama) induktasni dapat menjadi

$$L_{as ar} = L_{as br} = L_{as cr}, L_{bs ar} = L_{bs br} = L_{bs cr} =$$

$$L_{cs ar} = L_{cs br} = L_{cs cr}$$

Mengacu pada Gambar 4, dapat dilihat fase rotor ar ditempatkan pada fase stator as oleh sudut $electrical \theta_r$, variasi dari variabel θ_r untuk hubungan induktansi akan disesuaikan. Variabel faktor $sinus$ dan $cosinus$ maka hasil dari hubungan induksi menjadi.

$$L_{as ar} = L_{as br} = L_{as cr} = \frac{2 N_a N_r}{3 N_s^2} L_m = N_a L_{msr}$$

$$(3.54)$$

$$L_{bs ar} = L_{bs br} = L_{bs cr} = \frac{2 N_b N_r}{3 N_s^2} L_m = N_b L_{msr}$$

$$(3.55)$$

$$L_{cs ar} = L_{cs br} = L_{cs cr} = \frac{2 N_c N_r}{3 N_s^2} L_m = N_c L_{msr}$$

$$(3.56)$$

dengan

$$L_{msr} = \frac{2 N_r}{3 N_s^2} L_m \quad (3.57)$$

3.3 Pemodelan motor induksi dengan jumlah Belitan stator

Persamaan yang digunakan untuk model motor induksi asimetris dengan jumlah belitan pada stator, menggunakan sumbu acuan qd maka untuk setiap komponen resistansi dan induktansi menggunakan elemen matriks dari persamaan model motor induksi dengan jumlah stator. Sehingga didapatkan model motor dalam kerangka acuan qd adalah:

$$\frac{d}{dt} i_q^* = \frac{r^*}{L_{qq}^*} \lambda_q^* - \frac{\left(\frac{r^* L_{dq}^*}{L_{qq}^*} + \frac{r_s^* L_{dq}^*}{L_{qq}^*}\right)}{\left(\frac{L_{dd}^* L_{qq}^*}{L_{dq}^*} - L_{dq}^*\right)} i_q^*$$

$$+ \frac{\frac{L_{dd}^*}{L_{qq}^*}}{\left(\frac{L_{dd}^* L_{qq}^*}{L_{dq}^*} - L_{dq}^*\right)} V_q^* - \frac{\left(\frac{L_{dd}^* L_{dq}^*}{L_{qq}^*} - L_{dq}^*\right)}{\left(\frac{L_{dd}^* L_{qq}^*}{L_{dq}^*} - L_{dq}^*\right)} \omega_r i_d^* - \frac{\frac{L_{dq}^*}{L_{qq}^*}}{\left(\frac{L_{dd}^* L_{qq}^*}{L_{dq}^*} - L_{dq}^*\right)} \omega_r \lambda_q^*$$

$$(3.58)$$

$$\frac{d}{dt} i_d^s = \frac{\frac{r^s}{L_{22}^s}}{\left(\frac{L_{11}^s L_{22}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)} \lambda_d^s - \frac{\left(r^s \frac{L_{22}^s}{L_{21}^s} + r_{12}^s \frac{L_{11}^s}{L_{21}^s}\right)}{\left(\frac{L_{11}^s L_{22}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)} i_d^s$$

$$+ \frac{\frac{L_{11}^s}{L_{21}^s}}{\left(\frac{L_{11}^s L_{22}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)} V_d^s - \frac{\left(\frac{L_{22}^s L_{11}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)}{\left(\frac{L_{11}^s L_{22}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)} \omega_r i_q^s - \frac{\frac{L_{22}^s}{L_{21}^s}}{\left(\frac{L_{11}^s L_{22}^s}{L_{21}^s} - L_{12}^s\right)} \omega_r \lambda_q^s \quad (3.59)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_q^s = -r_{11}^s i_q^s + V_q^s \quad (3.60)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_d^s = -r_{22}^s i_d^s + V_d^s \quad (3.61)$$

3.4 Metode Kendali Torsi Langsung

Kendali Torsi Langsung (KTL) atau biasa disebut *Direct Torque Control* (DTC) adalah metode pengendalian torsi secara langsung berdasarkan kondisi elektromagnetik dari motor induksi. Pada KTL dimungkinkan untuk dilakukan pengendalian langsung torsi dan fluks stator dengan penentuan pemilihan vektor tegangan.

Rangkaian system KTL meliputi komperator histerisis, estimator torsi, nilai magnitude fluks dan posisi fluks stator, dan pemilihan vector tegangan (voltage selector) sebagai masukan inverter sumber tegangan atau bias disebut dengan Voltage Source Inverter (VSI) [13]

Pada pengestimasi menggunakan model tegangan, perhitungan parameter estimasinya menggunakan persamaan fluks stator estimasi. Fluks stator dan Torsi estimasi dihitung berdasarkan persamaan dinamik motor model kerangka acuan stator yang diberikan Persamaan (3.1). Persamaan model tegangan untuk mendapatkan estimasi fluks stator adalah

$$\lambda_q^s = \int (v_q^s - r_s i_q^s) dt \quad (3.62)$$

$$\lambda_d^s = \int (v_d^s - r_s i_d^s) dt \quad (3.63)$$

Dengan

$$v_q^s = \frac{2}{3} \left[v_{as} - \frac{1}{2} (v_{bs} + v_{cs}) \right] \quad (3.64)$$

$$v_d^s = \frac{1}{\sqrt{3}} [-v_{bs} - v_{cs}] \quad (3.65)$$

Untuk Persamaan model tegangan untuk mendapatkan estimasi fluks stator dengan jumlah belitan[2] menjadi:

$$\hat{\lambda}_q^s = \int (v_q^s - r_{11}^s i_q^s - r_{12}^s i_d^s) dt \quad (3.66)$$

$$\hat{\lambda}_d^s = \int (v_d^s - r_{21}^s i_q^s - r_{22}^s i_d^s) dt \quad (3.67)$$

$$\hat{\lambda}^s = \sqrt{(\hat{\lambda}_q^s)^2 + (\hat{\lambda}_d^s)^2} \quad (3.68)$$

Persamaan torsi dapat dilihat

$$T_e = \frac{3P}{2} (\hat{\lambda}_d^s i_q^s - \hat{\lambda}_q^s i_d^s) \quad (3.69)$$

Sedangkan untuk mendapatkan posisi fluks stator digunakan persamaan

$$\hat{\theta}_{\text{fluks}} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_q^s}{\hat{\lambda}_d^s} \right) \quad (3.70)$$

3.5 Penerapan Pengendali Kecepatan

Pengendali torsi langsung ini dapat diterapkan pengendali kecepatan baik untuk model setimasi tegangan. Berikut adalah implementasi pengendali kecepatan pengendali torsi langsung dengan metode PI. Masukan pengendali kecepatan berupa nilai kecepatan yang diukur dari estimasi kecepatan motor induksi dimana kecepatan motor sebanding dengan torsi elektromagnetik, masukan ini akan dibandingkan dengan kecepatan acuannya kemudian oleh PI sehingga menghasilkan torsi acuan yang akan dibandingkan dengan torsi estimasinya. Sehingga kesalahn torsi dapat dikendalikan oleh pengendali KTL.

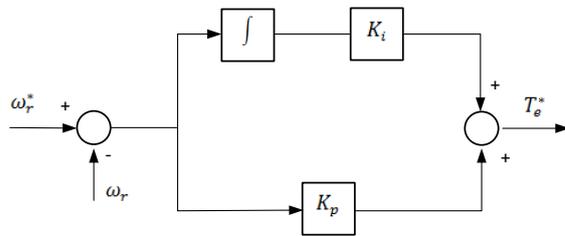
Referensi untuk kecepatan motor menggunakan masukan unit step untuk melihat keadaan saat terjadi perubahan resistansi di stator pada keadaan yang tidak dapat diperkirakan kapan terjadinya perubahan resistansi di stator.

Pada perancangan pengendali torsi langsung dapat diterapkannya pengendali kecepatan. Pengendali kecepatan menggunakan PI sebagai pengendalinya agar keluaran tunak sama dengan titik acuan yang merupakan masukan dari pengendali PI. Dengan rumus PI adalah

$$u = K_p (x - y) + K_i \int (x - y) \quad (3.71)$$

Dengan x adalah titik acuan, y adalah sinyal keluaran, dan u merupakan sinyal pengendali yang dihasilkan.

Pengendali kecepatan yang memiliki masukan kecepatan motor acuan dan kecepatan motor aktual (dengan sensor yaitu umpan balik langsung dari motor) atau kecepatan rotor estimasi (untuk tanpa sensor yaitu tidak diukur dari motor melainkan dihitung pada perhitungan estimasi) dengan Gambar 5.



Gambar 5. Blok Diagram Pengendali Kecepatan

Keluaran dari pengendali kecepatan ini dalam hal ini yaitu u atau sinyal kendali adalah torsi acuan T_e^* , karena kecepatan motor sebanding dengan torsi.

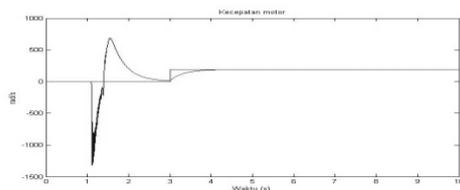
IV. SIMULASI DENGAN MOTOR 2 HP

Dari simulasi akan dilihat kecepatan rotor (ω_r), Fluks pada stator (λ_s) dan arus satu fasa dari stator (i_d), Konstanta histerisis torsi = 0.06 dengan melihat besaran nilai maksimum sebesar 0.6, sedangkan konstanta histerisi fluks adalah 0.12, $K_p = 0.00316$ dan konstanta integral $K_i = 0.089$.

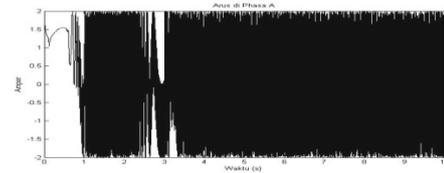
4.1 Simulasi dengan Jumlah Belitan Simetris Pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

Dari simulasi akan dilihat kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds.

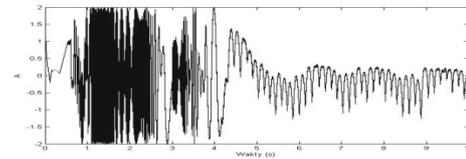
Pada metode kendali torsi langsung dengan pengendali PI sistem merespon perubahan nilai acuan, hal ini dapat diperlihatkan pada gambar 4.1 dimana sinyal kecepatan motor bekerja pada $t = 0.54$ detik menunjukkan kinerja dari motor, pada $t = 1.1$ detik kecepatan motor = 1200 rad/s, pada saat $t = 1.56$ detik kecepatan motor 800 rad/s, pada $t = 3$ detik kecepatan motor mengikuti sinyal acuan pengendali.



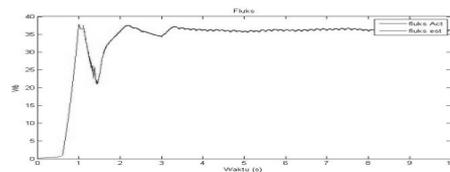
Gambar 6. Kecepatan motor dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



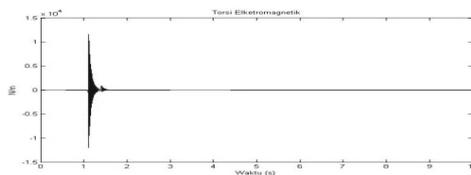
Gambar 7. Arus Phasa A dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



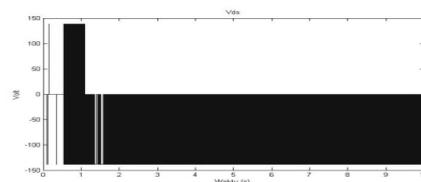
Gambar 8. Arus Phasa B dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



Gambar 9. Fluks dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



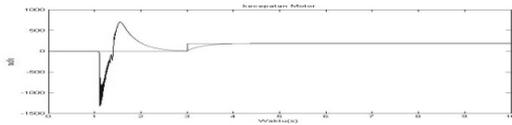
Gambar 10. Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252



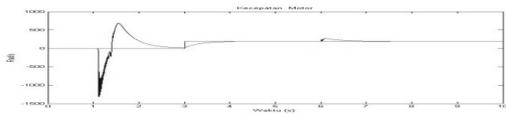
Gambar 11. Inverter dengan jumlah belitan pada Phasa A 252 Phasa B 252 dan Phasa C 252

4.2 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Phasa A 242 Phasa B 252 dan Phasa C 252 dan Jumlah Belitan Pada Phasa A 252 Phasa B 242 dan Phasa C 252

Dari hasil simulasi akan diperlihatkan kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds pada motor 2 HP yang ditunjukkan oleh Gambar 12

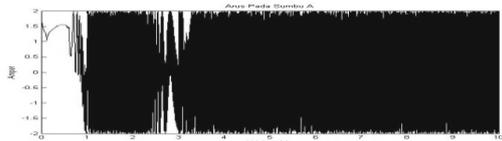


(a)

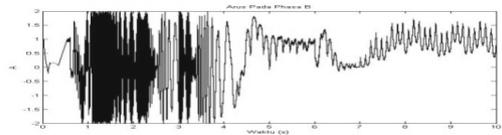


(b)

Gambar 12. (a) Kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Fase A 242, dan (b) kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Fase B 242

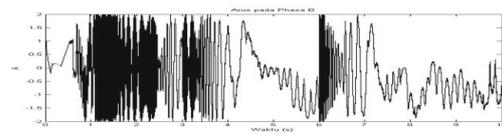


(a)

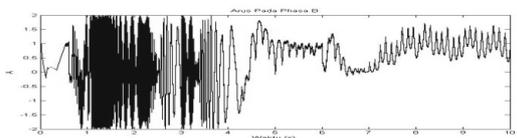


(b)

Gambar 13 (a) Arus pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase A 242, dan (b) Arus pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase B 242

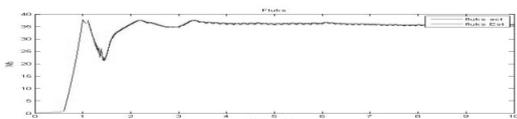


(a)

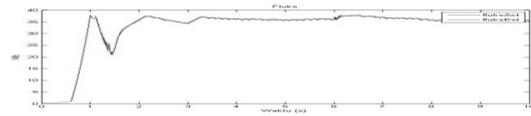


(b)

Gambar 14 (a) Arus pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase A 242, dan (b) Arus pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase B 242

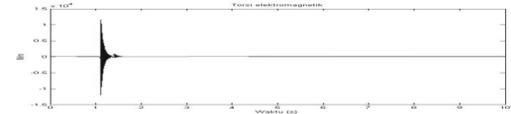


(a)

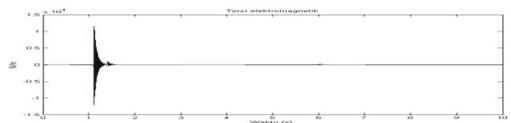


(b)

Gambar 15. (a) Fluks pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase A 242. Dan (b) Fluks pada Fase A dengan jumlah belitan Pada Fase B 242

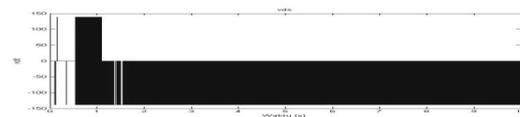


(a)

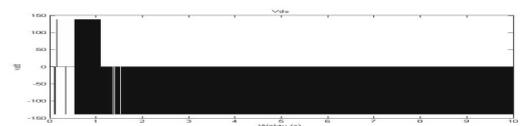


(b)

Gambar 16 (a) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Fase A 242, Fase B 252 dan Fase C 252, dan (b) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Fase A 252, Fase B 242 dan Fase C 252



(a)



(b)

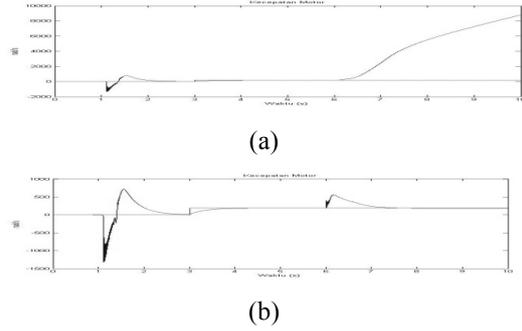
Gambar 17. (a) Inverter dengan jumlah belitan Pada Fase A 242, Fase B 252 dan Fase C 252, (b) Inverter dengan jumlah belitan Pada Fase A 252, Fase B 242 dan Fase C 252

Hasil simulasi menunjukkan bahwa motor masih dapat bekerja dikarenakan pemilihan inverter masih bekerja dengan baik.

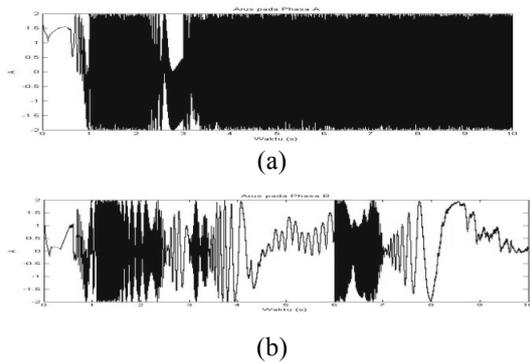
4.3 Simulasi dengan Jumlah Belitan Pada Fase A 200 Fase B 252 dan Fase C 252 dan Jumlah Belitan Pada Fase A 252 Fase B 200 dan Fase C 252

Dari hasil simulasi akan dilihatkan kecepatan motor (ω_r), arus sumbu a (I_a^s), arus

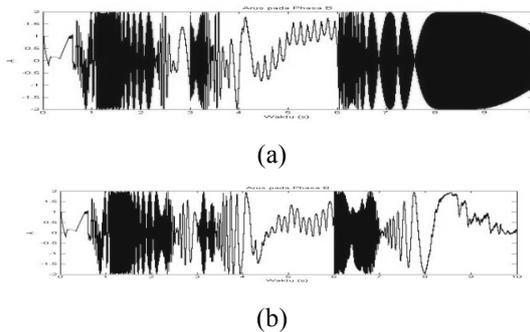
sumbu b (I_b^s), fluks stator (λ_s), torsi (T_e) dan tegangan masukan di sumbu vds pada motor 2 HP yang ditunjukkan oleh gambar 4.19- 4.24.



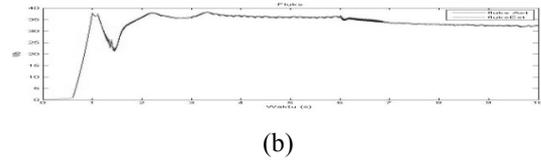
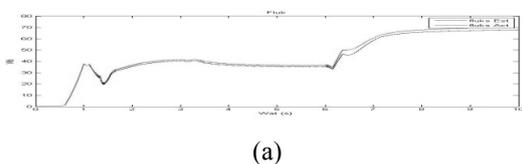
Gambar 18.(a)Kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, dan (b) kecepatan motor dengan jumlah belitan Pada Phasa B 200



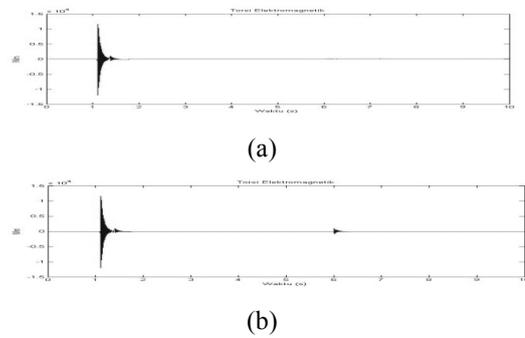
Gambar 19.(a)Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200, dan (b) Arus Pada Phasa A dengan jumlah belitan Phasa B 200



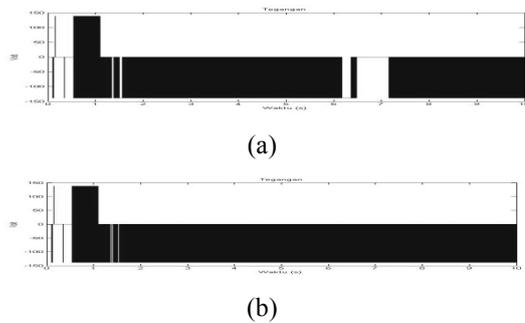
Gambar 20. (a)Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200 dan (b) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Phasa B 200



Gambar 21. (a)Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200 dan (b) Arus Pada Phasa B dengan jumlah belitan, Phasa B 200



Gambar 22. (a)Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200,dan (b) Torsi Elektromagnetik dengan jumlah belitan Pada Phasa B 200 d



Gambar4.24.(a)Inverter dengan jumlah belitan Pada Phasa A 200,dan (b) Inverter dengan jumlah belitan Pada B 200

Dari hasil simulasi untuk model motor dengan jumlah belitan pada fase A 200, fase B 252 dan fase C 252 unjuk kerja inverter sebagai masukan pada $t = 6.2$ detik terhenti sampai $T=7$ detik ini menunjukkan bahwa motor tidak dapat bekerja dengan semestinya, sedangkan untuk motor dengan jumlah belitan pada fase A 250, fase B 200 dan fase C 252 unjuk kerja torsi elektromagnetik melonjak sangat besar pada $T=6$ detik ini menunjukkan bahwa motor tidak dapat bekerja dengan baik.

V. KESIMPULAN

Dari keseluruhan pembahasan dalam laporan ini, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Motor 2 HP dengan jumlah belitan dari 252, 242 dan 222 memiliki rata-rata penurunan kecepatan 2 rad/s sampai dengan 4 rad/s .
2. Kecepatan motor pada Phasa A dengan jumlah 200 belitan menyebabkan kecepatan motor tidak terkendali, karena masukan inverter yang tidak bekerja pada $t=6.3$ detik sampai dengan $t=7.3$ detik.
3. Kecepatan motor pada Phasa B dengan jumlah 200 belitan, dapat terkendali tetapi torsi saat $t= 6$ detik melonjak sampai dengan 950 N/m.
4. Pengendalian PI menunjukkan respon kecepatan yang dipengaruhi oleh perubahan resistansi memiliki batasan unjuk kerja motor terhadap fluks dan torsi.
5. Perubahan resistansi pada stator dapat digunakan sebagai pendeteksi awal kerusakan yang akan terjadi pada motor.

REFERENSI

- [1] M. Arkan, *Stator Fault Diagnosis in Induction Motors*, University of Sussex, Ph.D. Thesis, 2000.
- [2] Chapman, Stephen J, *Electric Machinery Fundamental*, 2nd Edition, McGraw-Hill International Edition in Electric Series 1991
- [3] F. Yusivar dan S. Wakao, *Minimum Requirements of Motor vector control Modelling and simulation Utilizing C MEX S-function in MATLAB/SIMULINK*, IEEE journal 2001
- [4] Abdel Nasir Abdalla, *Torque Ripple Minimization In Direct Torque Control OF Induction*, Thesis, The University of Akron, May 2005
- [5] P. Krause, O. Wasynczuk, S.D. *Sudhoff, Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press Power Engineering Series, 2002.
- [6] D.W. Novotny, T.A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [7] P. Krause, O. Wasynczuk, S.D. *Sudhoff, Analysis of Electric Machinery*, IEEE Inc, 1995 , ISBN 0-7803-1101-9.
- [8] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Oxford Science Publications, 1999.
- [9] C.M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall PTR, 1998, ISBN 013-723785-5.
- [10] Paul C.Krause, Oleg Wasyncuk, Scoot D. Sudhoff, *Analysis Of Machinery And Drive Systems*, 2nd Edition, IEEE Press.
- [11] Asriningtyas, N., "Perbandingan Estimasi Model Tegangan dan Model Arus pada Pengendali Torsi Langsung Motor Induksi Tiga Fasa", Skripsi, UI, Juni 2004.