

ANALISA PERBANDINGAN PID DAN PD PADA PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI FASA TIGA BERBASIS TUNING SIMULASI MATLAB

Siswandi

Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya
Jln. Srijaya Negara Bukit Besar Palembang 30139
e-mail: c.siswandi@yahoo.co.id

ABSTRAK

Motor induksi fasa tiga banyak digunakan di industri karena memiliki konstruksi yang sederhana, murah dan biaya operasi rendah. Keunggulan motor induksi fasa tiga diantaranya handal, tidak ada kontak antara stator dan rotor kecuali bearing, tenaganya besar, daya listrik rendah dan hampir tidak ada perawatan.

Sistem kendali adalah suatu alat (kumpulan alat) untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan suatu sistem. Sistem kendali mengevaluasi kondisi sistem kemudian mengambil tindakan guna mencapai kehendak. Sistem kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan sistem kendali untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpanbalik pada sistem tersebut. Dalam implementasinya masing-masing dapat bekerja sendiri maupun gabungan yang dapat memperbaiki respon transien, menghilangkan *error steady state* dan memberikan efek redaman. Untuk sistem kendali PD (*Proportional-Derivative*) dapat mengurangi *overshoot* dan waktu turun, tetapi kesalahan keadaan tunak tidak mengalami perubahan yang berarti.

Sistem kendali PD dan PID pada motor induksi fasa tiga dengan kendali tersebut akan mendapatkan bandingan, bila dilakukan dengan bermacam-macam beban terhadap torsi dan kecepatan. Adapun metode yang akan dilakukan adalah trial and error yang disimulasikan dengan bahasa pemrograman MATLAB simulink dan melakukan Tuning pada MATLAB.

Kata Kunci: Kendali PID,PD,Motor induksi fasa tiga dan overshoot

ABSTRACT

Three phase induction motors are widely used in the industry because it has a simple construction, low-cost and low operating costs. The advantages of three phase induction motors including reliable, no contact between the stator and rotor except for bearing, great power, low electric power and virtually no maintenance.

Control system is a tool for controlling (combined tool), for controlling, administer and regulate system. Control system evaluates the condition of the system then take action to achieve the will. Control system PID (Proportional-Integral-Derivative) a control system to determine the precision of an instrumentation system with the characteristics of the feedback on the system. In the implementation of each their own work or combined. Derivative or slope of the control response have a dampening effect, control the response returned to the set point so quickly that it would "over shoot" set point. For PD control system (Proportional-Derivative) can reduce the overshoot and the time off, but the steady-state error not change significantly.

PD and PID control systems on three-phase induction motors the control to get comparison with a variety of load torque and speed. The method to be performed is trial and error is simulated with simulink MATLAB programming language also been tuned.

Keyword: Controller PID,PD,Induction Motor,three phase and overshoot

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kendali mengevaluasi kondisi sistem , untuk selanjutnya mengambil tindakan guna mencapai kehendak. Sistem kendali dibutuhkan untuk memperbaiki tanggapan sistem dinamik agar didapat sinyal keluaran seperti yang diinginkan.

Sistem kendali PID terdiri dari tiga macam cara pengendalian yaitu, P (proportional), I (Integral) dan D (derivative) dengan masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Untuk mengimplementasikannya sistem kendali PID tersebut dapat bekerja sendiri-sendiri ataupun gabungan dan merupakan sistem lingkup yang tertutup. Jenis apa yang harus digunakan diputuskan berdasarkan sifat plant dan kondisi kerja, misalnya motor listrik (motor induksi).

Motor induksi banyak dipakai untuk berbagai keperluan dengan berbagai ukuran dan daya yang berbeda. Konstruksi motor induksi sangat sederhana dan kuat serta memiliki karakteristik kerja yang baik. Medan putar dibangkitkan oleh tiga buah kumparan yang dialiri dengan tegangan bolak balik. Didalam medan putar terdapat penghantar-penghantar yang merupakan rangkain tertutup.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah :

- 1.menerapkan pemodelan motor induksi fasa tiga untuk dikendalikan oleh PID dan PD melalui simulasi pemodelan.
- 2.Mengetahui perbedaan sistem kendali mana yang cocok untuk motor induksi fasa tiga.
3. Didapatkan hasil respon yang lebih baik dengan menggunakan sistem Kendali PID dan PD untuk motor induksi fasa tiga.
- 4.Menganalisa dan membandingkan hasil dari PID dan PD pada motor induksi fasa tiga.

1.3.Manfaat

- 1.Dapat memberikan nilai positif bagi peneliti dan pembaca ini yang berkenaan dengan pengetahuan dan pemahaman didalam perancangan simulasi motor induksi fasa tiga dengan bantuan Matlab Simulink.
2. Dapat memberikan acuan kepada perancang dan peneliti yang lain untuk dapat melakukan penelitian lebih lanjut.

1.4.Permasalahan

Untuk menemukan masalah dalam judul penelitian ini dengan meninjau latar belakang. Permasalahan yang diangkat dalam keterkaitan pengendalian motor induksi fasa tiga terhadap sistem kendali PID dan PD dengan bermacam-macam beban dan membuat model sistem, sehingga dapat menganalisa perbandingan hasil dari kedua sistem kendali tersebut yang simulasikan dengan MATLAB.

1.5.Metode Pembahasan

1. Mempelajari literatur yang berkenaan dengan materi perancangan dan penelitian ini.
- 2.Menentukan model matematik simulasi rangkaian motor induksi fasa tiga dan membuat persamaannya.
- 3.Menerapkan hasil perancangan kedalam bentuk simulasi Matlab Simulink setelah menentukan persamaan fungsi alih .
- 4.Merancang rangkaian simulink untuk di terapkan ke PID dan PD pada model persamaan motor induksi fasa tiga dengan melakukan trial and error.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1.Kendali Proporsional dan Dervative (PD)

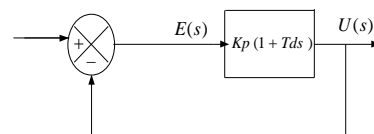
Kendali proporsional ditambah turunan didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$U(t)=K_p e(t)+K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

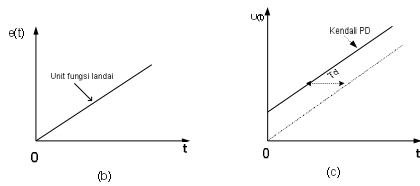
dan fungsi alihnya adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1+T_d s)\dots\dots\dots(2.2)$$

dengan K_p adalah penguatan proporsional dan T_d konstanta yang disebut waktu turunan. K_p dan T_d keduanya dapat ditentukan. Aksi kendali turunan kadang-kadang disebut laju kendali dengan besaran keluaran kendali proporsional ke laju perubahan sinyal pembangkit kesalahan. Waktu turunan T_d adalah waktu interval dengan laju aksi memberikan pengaruh pada kendali proporsional. Gambar 2-1-a menunjukkan diagram blok kendali proporsional yang ditambah turunan. Jika sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ unit fungsi landai seperti ditunjukkan pada gambar 2-1-b, maka keluaran kendali menjadi seperti pada gambar 2-1-c. Seperti dapat dilihat pada gambar 2-4-c, aksi kendali turunan mempunyai karakter antisipasi. Namun demikian, aksi kendali turunan tidak dapat mengantisipasi aksi lain yang belum pernah dilakukan. Satu pihak aksi kendali mempunyai keuntungan mengantisipasi, tetapi dipihak lain juga mempunyai kelemahan yaitu adanya gangguan sinyal penguatan yang dapat bercampur pada pembangkit (aktuator). Kendali turunan tidak pernah digunakan sendiri karena kendali ini hanya efektif selama periode transient.



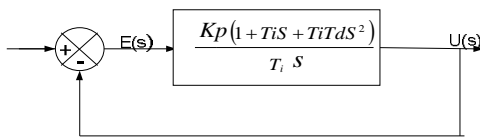
Gambar 2-1-a. diagram blok kendali proporsional ditambah turunan.



Gambar 2-1.(b) dan (c) diagram yang menggambarkan unit masukan fungsi landai dan keluarannya (Zuhal,13;2004).

2.2 Kendali Proporsional ditambah Integral ditambah Derivative (PID).

Kombinasi dari kendali proporsional, kendali integral, kendalidervative disebut kendali proporsional ditambah integral ditambah derivative. Kombinasi ini mempunyai keuntungan dibanding masing-masing kendali. Dikombinasikannya ketiga jenis kendali tersebut menjadi satu sistem kendali tunggal. Diagram blok kendali proporsional ditambah integral ditambah derivative ditunjukkan pada gambar 2-2.a.



Gambar 2-2-a diagram blok kendali proporsional di-integral + derivative.

Persamaan dari tiga kombinasi ini diberikan oleh

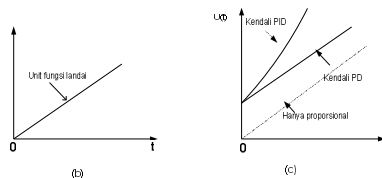
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.3)$$

atau fungsi alihnya:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan K_p penguatan proporsional, T_i waktu integral, dan T_d waktu turunan.

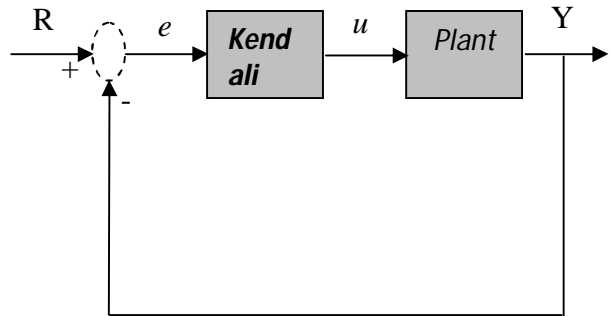
Pada gambar 2-2.(b) dan (c) menunjukkan unit masukan fungsi landai dan keluaran kendali.



Gambar 2-2-b dan 2-2-c diagram yang menggambarkan unit masukan fungsi landai dan keluaran kendali PID.

Setiap sistem kendali harus stabil, ini merupakan persyaratan utama. disamping kestabilan mutlak. Sistem kendali harus mempunyai kestabilan relatif yang layak, jadi kecepatan respon harus cukup cepat dan menunjukkan peredaman yang layak. Suatu sistem kendali juga harus mampu memperkecil kesalahan (Zuhal,13;2004).

Feedback control system adalah sistem kontrol yang cenderung menjaga hubungan yang telah ditentukan antara keluaran dan masukan dengan membandingkannya dan menggunakan selisihnya sebagai alat pengendalian.



Gambar 2-2. Feedback control system

Plant adalah sistem yang harus dikontrol. Kendali memberikan rencana yang mantap dan didesain untuk mengendalikan tingkah laku yang menyeluruh

dari sistem. Fungsi transfer dari Kendali PID akan tampak sebagai berikut :

$$K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan :

- $K_p = Proportional\ gain$
- $K_I = Integral\ gain$
- $K_D = Derivative\ gain$

Cara kerja Kendali PID pada sistem loop tertutup menggunakan skema pada Gambar 2-2 diatas. Signal error (e) dikirim ke kontrol PID, Kontrol PID akan menghitung keseluruhan turunan dan integral dari signal error (e) ini. Signal (u) yang telah melewati kendali, sekarang sama dengan Proportional gain (K_p) dikalikan ukuran kesalahannya ditambah Integral gain (K_I) dikalikan ukuran kesalahan integralnya ditambah Derivative gain (K_D) dikalikan ukuran kesalahan derivasinya.

$$u = K_p e + K_I \int edt + K_D \frac{de}{dt} \dots\dots\dots(2.6)$$

Signal (u) akan dikirim ke plant, dan akan mendapatkan keluaran baru (Y). Keluaran baru (Y) ini akan dikirim kembali kesensor untuk mencari kesalahan signal baru (e). Controller membawa kesalahan signal baru (e) tersebut dan menghitung turunan-turunannya dan integral-integralnya sekali lagi. Proses tersebut akan berjalan terus-menerus seperti semula.

Tabel 2-2-1. Tipe dan Fungsi Transfer *Controller*

Tipe controller	Fungsi transfer
Proportional (P)	$G_c = K$
Proportional-Integral (PI)	$G_c = K \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right)$
Proportional - Derivatives (PD)	$G_c = K(1 + \tau s)$
Proportional-Integral-Derivatives (PID)	$G_c = K \left(1 + \frac{1}{\tau s} + \tau s \right)$

Dalam sistem tunggal ketiga kendali (P, I, D) tidak perlu diterapkan bersamaan. Kendali Proporsional (K_p) yang akan memberikan efek mengurangi waktu naik dan meningkatkan overshoot, Kendali Integral (K_i) yang akan memberikan efek menghapus kesalahan keadaan tunak, dan Kendali Derivative (K_d) yang akan memberikan efek meningkatkan stabilitas sistem. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2-2, yang menunjukkan efek dari setiap kendali (K_p, K_i, K_d) dalam sistem loop tertutup.

Tabel 2-2-2. Efek controller dalam sistem lup tertutup

Respon Loop Tertutup	Waktu Naik	Overshoot	Waktu Turun	Kesalahan Keadaan Tunak
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K_d	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

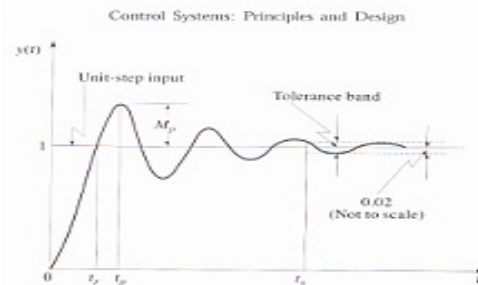
Hubungan korelasi tersebut tidak sepenuhnya akurat, karena $K_p, K_i,$ dan K_d saling bebas.

Menganalisis respon system untuk memasukkan seperti, fungsi langkah satuan, fungsi landai (ramp) satuan dan fungsi impuls satuan dan dengan syarat awal adalah nol. Respon transien pada sistem praktis sering menampilkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan tunak (*steady state*). Dalam menentukan respon transien karakteristik sistem kendali terhadap masukan tangga satuan, biasanya parameter yang menentukan adalah seperti dibawah ini.

1. Waktu naik (*rise time*), t_r
2. Waktu puncak (*peak time*), t_p

3. Lewatan maksimum (*peak overshoot*), M_p
4. Waktu penetapan (*settling time*), t_s
5. Waktu tunda, t_d (*time delay*)
6. Kesalahan keadaan tunak (*error steady state*)

Adapun grafik spesifikasinya dapat dilihat pada gambar 2-3 dibawah ini.



Gambar 2-3 tipikal unit step respon pada sistem kendali.

Waktu naik, t_r didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 0% sampai 100% dari harga akhir. Untuk sistem redaman lebih digunakan waktu naik sebesar 10% sampai 90%.

Waktu naik, t_r

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad \beta = \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Dimana; $\sigma = \zeta \omega_n$

Waktu puncak, t_p didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai puncak lewatan.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Lewatan maksimum, M_p didefinisikan sebagai harga puncak respon kurva yang diukur dari satu. Jika harga respon keadaan tunak respon berbeda dari satu, maka digunakan persen lewatan maksimum yang didefinisikan oleh:

Persen lewatan maksimum,

$$= \frac{y(sp) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100 \%$$

Dimana, persen lewatan maksimum,

$$M_p = 100e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} \%$$

Besarnya persen lewatan maksimum menunjukkan kestabilan relative dari system.

Waktu penetapan, t_s didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah sekitar harga akhir sekitar 2% atau 5% dalam gambar $\pm 2\%$.

Untuk kriteria toleransi 5% ,
$$t_s = \frac{3}{\zeta \cdot \omega_n}$$

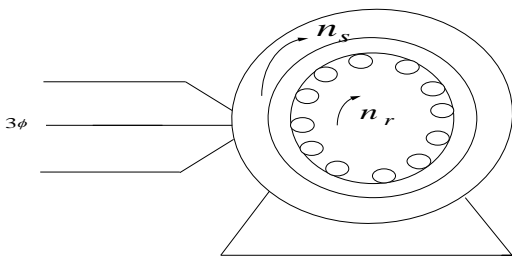
Waktu tunda, t_d didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir untuk waktu yang pertama. Dengan demikian , waktu tunda,
$$t_d = \frac{1 + 0.7 \zeta}{\omega_n}$$

Kesalahan keadaan tunak , e_{ss} dapat diberikan dengan :

$$E_{ss} = \frac{2\zeta}{\omega_n}$$

2.3 Motor Listrik Arus Bolak-Balik.

Pada dasarnya terdapat dua jenis motor arus listrik bolak-balik, yaitu motor sinkron atau motor serempak dan motor induksi atau motor tak serempak. Motor sinkron tidak begitu banyak dipakai dan pada umumnya dipergunakan pada aplikasi-aplikasi khusus, seperti kondensor sinkron, untuk memperbaiki faktor daya jaringan listrik. Motor sinkron yang dipakai pada umumnya berukuran besar. Berbeda dengan motor induksi yang luar biasa banyaknya dipakai untuk berbagai keperluan dan dengan berbagai ukuran dan daya. Karenanya pembahasan tesis ini hanya pada motor induksi, yaitu motor induksi fasa tiga.



Gambar 2-4. motor induksi fasa tiga

Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan sumber fasa tiga yang seimbang. Prinsip kerja motor fasa tiga sebagai berikut : Apabila sumber tegangan bolak-balik tiga fasa dihubungkan pada kumparan stator, maka timbullah medan putaran dengan kecepatan :

$$n_s = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana : n_s = Kecepatan Medan putar stator atau kecepatan sinkron (rpm)
 f = Frekuensi (Hertz)
 P = Jumlah kutub

Medan putaran stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor, sehingga pada kumparan rotor timbul induksi (ggl). Karena rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka ggl (E) akan

menghasilkan arus (I), adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor. Bila kopel (*torque*) mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putaran stator.

Syarat terbentuknya tegangan induksi pada motor induksi tiga fasa haruslah ada perbedaan kecepatan relative (disebut sebagai “slip”) antara kecepatan medan putar stator (n_s) dan kecepatan putar rotor (n_r). Karena $n_s \neq n_r$, maka motor induksi disebut sebagai motor tak serempak (asinkron). Bila $n_r = n_s$ tegangan tidak terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s .

Misalkan :

n_s = kecepatan medan putar (= kecepatan sinkron)
 n_r = kecepatan rotor
 ggl berbanding lurus dengan ($n_s - n_r$)

$$n_s - n_r = n_s \left(1 - \frac{n_r}{n_s} \right),$$

dimana slip = $s = \left(1 - \frac{n_r}{n_s} \right) \dots\dots\dots(2.8)$

dengan demikian besar gaya gerak listrik (ggl) yang diinduksikan berbanding lurus dengan slip (s). Bila mana gaya gerak listrik yang dibangkitkan dalam rotor tersebut E_r , maka perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip atau secara rumus :

$(E_r)_{s=s} : (E_r)_{s=1} = s : 1 = s$
 atau $(E_r)_{s=s} = s(E_r)_{s=1} \dots\dots\dots(2.9)$

Untuk keadaan $s = 1$ berarti motor tidak bergerak dan $n_r=0$, dan mesin akan mulai berputar. Setelah mulai berputar, ggl mulai menurun. Arus induksi tergantung pada impedansi, akan menurun juga dan kecepatan akan mendekati kecepatan sinkron n_s . Pada waktu kecepatan sinkron dicapai, gaya gerak listrik adalah nol, tidak ada arus, dan diperoleh situasi sinkron dan rotor berputar sinkron dengan medan putar. Namun, karena dalam keadaan tidak ada arus induksi, maka tidak akan ada pula gaya Lorenz, dan tidak ada momen untuk menggerakkan rotor. Dengan demikian situasi sinkron tidak akan tercapai. Besarnya frekwensi dari induksi dalam rotor akan tergantung dari kecepatannya berputar, dan berbanding lurus dengan slip (s).

$$f_2 = s f_1 \dots\dots\dots(2.10)$$

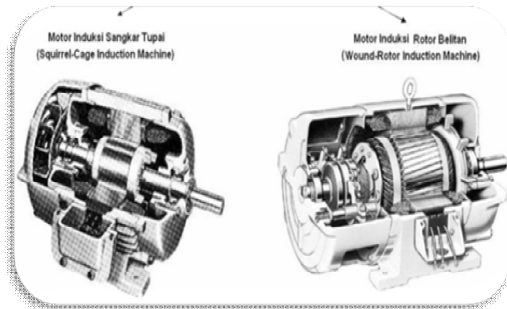
dimana :
 f_1 = frekwensi arus stator
 f_2 = frekwensi arus rotor

Stator sering disebut sebagai sisi primer dan rotor sebagai sisi sekunder. Stator menghasilkan medan putar yang dinamakan medan stator. Arus-arus induksi yang mengalir didalam rotor mengakibatkan sebuah medan, yaitu medan rotor yang uga merupakan medan putar.

Frekwensi rotor adalah : $f_2 = s f_1$
 Kecepatan putar rotor adalah : $\omega_2 = s \omega_1$

Kecepatan putar rotor terhadap stator adalah kecepatan medan putar stator. Dengan demikian terlihat bahwa pada saat *start* dan rotor belum berputar, frekwensi pada stator dan rotor sama. Dalam keadaan rotor berputar, frekwensi arus rotor dipengaruhi oleh slip ($f_2 = sf_1$). Kerena tegangan induksi dan reaktansi kumparan rotor merupakan fungsi frekwensi, maka harganya turut pula dipengaruhi oleh slip.[14]
Motor listrik induksi dibagi menjadi 2 macam berdasarkan rotornya, yaitu :

- a. Motor listrik induksi rotor sangkar
- b. Motor listrik induksi rotor belitan.

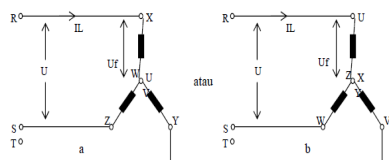


Gambar 2-5. Motor Induksi Rotor Sangkar Tupai & Rotor Belitan

2.4 Hubungan Bintang dan segitiga Motor Induksi Tiga Fasa.

Hubungan kumparan stator motor induksi fasa tiga dapat dibuat dalam dua hubungan yaitu : hubungan bintang (Y) dan hubungan delta (Δ). Untuk memudahkan dan menghindari kesalahan maka setiap ujung – ujung kumparan yang dihubungkan dengan terminal diberi tanda atau kode.

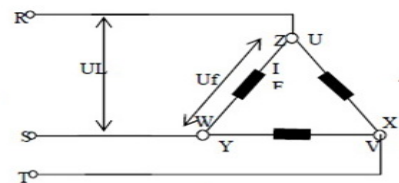
Untuk menghubungkan bintang ketiga lilitan fasa stator dapat dilakukan dengan jalan menghubungkan awal masing – masing lilitan fasa stator (U, V,W) dan ujung (X,Y,Z) dihubungkan kejala – jala R,S,T atau sebaliknya yaitu dengan menghubungkan ujung masing – masing lilitan fasa (X,Y,Z) dan awal (U,V,W) dihubungkan kejala – jala R,S,T seperti yang terlihat pada gambar 2-6.a. Namun secara umum cara penyambungan hubungan bintang pada motor induksi tiga fasa seperti pada gambar .2-6.b.



Gambar 2-6. Hubungan Bintang, (a) kejala-jala, (b) Dihubungkan Motor Induksi Tiga Fasa

Untuk menghubungkan segitiga dan delta lilitan fasa stator dapat dilakukan dengan menghubungkan ujung lilitan fasa pertama dengan awal lilitan fasa

kedua (X,V) dan ujung lilitan fasa kedua dengan awal lilitan fasa ketiga (Y,W), serta ujung lilitan fasa ketiga dengan awal lilitan fasa pertama (Z,U), atau awal lilitan fasa pertama dengan ujung lilitan fasa kedua (U,Y), awal lilitan fasa kedua dengan ujung lilitan fasa ketiga (V,Z) dan awal lilitan fasa ketiga dengan ujung lilitan fasa pertama (W,X). seperti terlihat pada gambar 2-7. Namun secara umum cara penyambungan hubungan segitiga pada motor induksi tiga fasa seperti pada gambar 2-7



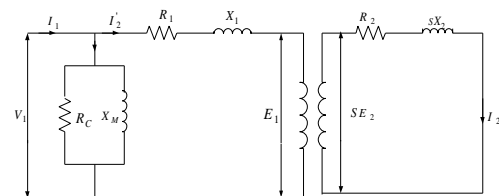
Gambar 2-7. Hubungan Delta Pada Motor Induksi Fasa Tiga

Pada hubungan delta tegangan yang terdapat pada lilitan fasa stator sama dengan tegangan line antara fasa dengan fasa. Sedangkan arus yang mengalir pada lilitan fasa stator motor adalah sebesar arus line yang digunakan motor Lilitan fasa stator dibuat dengan tegangan kerja (tegangan nominal) yang tertentu besarnya, seperti yang telah diuraikan bahwa tegangan kerja motor tiga fasa untuk hubungan bintang berbeda dengan hubungan delta. Bila motor dihubungkan bintang maka tegangan kerjanya menjadi tiga kali tegangan kerja lilitan fasa stator, sedangkan bila dihubungkan delta maka tegangan kerja sama dengan tegangan kerja lilitan fasa stator.

3. METODELOGI PEMBAHASAN

3.1 Rangkaian ekivalen motor induksi fasa tiga.

Kerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Oleh karena itu motor induksi dapat dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Dengan demikian rangkaian motor induksi dapat dilukiskan seperti pada gambar 3-1 untuk selanjutnya dibuatkan pemodelan.

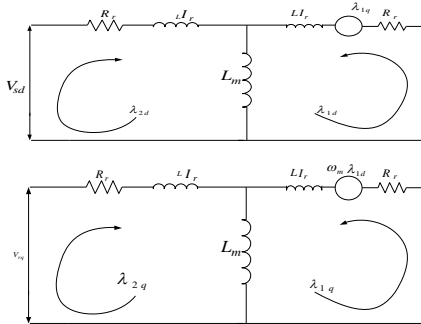


Gambar 3-1 rangkaian ekivalen motor induksi

3.2 Pemodelan Motor Induksi fasa tiga.

Model rangkaian ditinjau untuk membuat ekivalen motor induksi. Hal ini bertujuan untuk mempermudah penganalisaan terhadap motor induksi. Sebuah model ‘rekaan’ yang mendeskripsikan motor induksi sebagai sistem yang terdiri dari vektor-vektor yang didefinisikan dengan dua koordinat *orthogonal* dan

polar. Komponen vektor ruang diasosiasikan dengan pasangan variabel, yaitu bagian *direct* dan *quadrature* (*d-q*). Model rangkaian ekuivalen digambarkan seperti pada gambar 3-2 dibawah ini.



Gambar 3-2 Model Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Model rangkaian ini dideskripsikan dari perilaku fisik motor putaran sinkron (*d-q*) *reference frame* untuk memperoleh model persamaan matematika. Model rangkaian ini akan menjelaskan apa yang diinginkan dan memiliki pemahaman yang baik tentang karakteristik dan fenomena fisik yang terjadi pada motor induksi.

Pemodelan dimulai dengan mendefinisikan variabel-variabel dan parameter-parameter yang digunakan, untuk memudahkan dalam menguraikan dan memberikan nilai pada variable-variabel serta parameter-parameter dari model matematika sistem.

3.3 Pemodelan matematika motor induksi fasa tiga.

Pemodelan matematika motor induksi dapat diperoleh melalui proses analisa dinamik dari motor induksi. Dengan demikian didapat persamaan tegangan acuan :

$$V_{sd}(t) = R_s \cdot i_{sd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \tag{3.1}$$

$$V_{sq}(t) = R_s \cdot i_{sq}(t) + n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \tag{3.2}$$

$$V_{rd}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rd} \tag{3.3}$$

$$V_{rq}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rq}(t) + n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rd} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} \tag{3.4}$$

$V_{rd}(t)$, $V_{rq}(t) = 0$ jika menggunakan jenis motor squerrel cage (sangkar tupai), sehingga persamaan medan putarnya didapat;

$$\lambda_{sd} = L_s \cdot i_{sd}(t) + L_m \cdot i_{rd}(t) \tag{3.5}$$

$$\lambda_{sq} = L_s \cdot i_{sq}(t) + L_m \cdot i_{rq}(t) \tag{3.6}$$

$$\lambda_{rd} = L_s \cdot i_{rd}(t) + L_m \cdot i_{sd}(t) \tag{3.7}$$

$$\lambda_{rq} = L_s \cdot i_{rq}(t) + L_m \cdot i_{sq}(t) \tag{3.8}$$

Torsi elektromagnetiknya adalah :

$$T_{em} = n_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t)) \tag{3.9}$$

Didapat persamaan elektrodinamiknya adalah :

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_b(t) - T_L(t) \tag{3.10}$$

$$T_b(t) = B_m \cdot \omega_m(t) \tag{3.11}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m(t) = \omega_m(t) \tag{3.12}$$

3.4 Persamaan ruang keadaan dan diagram blok keadaan motor induksi fasa tiga.

Dari pemodelan matematika di atas, persamaan-persamaan tersebut dapat disederhanakan untuk memperoleh persamaan keadaan (*state space*) yang kemudian digambarkan dalam bentuk vektor matriks persamaan keadaan. Selanjutnya dari persamaan keadaan akan didapatkan diagram blok keadaan yang akan membantu dalam menentukan diagram blok sistem nantinya.

Pertama, persamaan yang harus diuraikan adalah persamaan tegangan acuan masukan (3.1) dan (3.4) :

$$\frac{d}{dt} i_{sd}(t) = \beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \beta \lambda_{rd} + \gamma i_{sd}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd}(t) \tag{3.13}$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq}(t) = -\beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rd} + \eta \beta \lambda_{rq} - \gamma i_{sq}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq}(t) \tag{3.14}$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) = -n_p \omega_m(t) \lambda_{rq} - \eta \lambda_{rd} + \eta L_m i_{rd}(t) \tag{3.15}$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) = n_p \omega_m(t) \lambda_{rd} - \eta \lambda_{rq} + \eta L_m i_{rq}(t) \tag{3.16}$$

Dari persamaan (37) dan (39) maka :

$$\frac{d}{dt} \omega_m(t) = n_p \cdot \frac{L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(t) - \lambda_{rq} i_{sd}(t))}{L_r J_{eq}} - \frac{B_m}{J_{eq}} \omega_m(t) - \frac{T_L(t)}{J_{eq}} \tag{3.17}$$

Dimana : $\eta = \frac{R_r}{L_r}$;

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r};$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r};$$

$$\gamma = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_a \cdot L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s}$$

$$\mu = n_p \frac{L_m}{J_{eq} \cdot L_r};$$

dan

Dari persamaan (3.12) sampai dengan persamaan (3.13) di atas dapat digambarkan dengan vektor matriks persamaan ruang keadaan (*state space*) berikut ini :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \\ \frac{d}{dt} \omega_m(t) \\ \frac{d}{dt} \theta_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta\beta & \beta n_p \omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta n_p \omega_m & -\eta\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\eta & -n_p \omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_p \omega_m & -\eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu i_{sq}(t) - \mu i_{sd}(t) & 0 & 0 & 0 & -\frac{B_m}{J_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta L_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ i_{rd}(t) \\ i_{rq}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

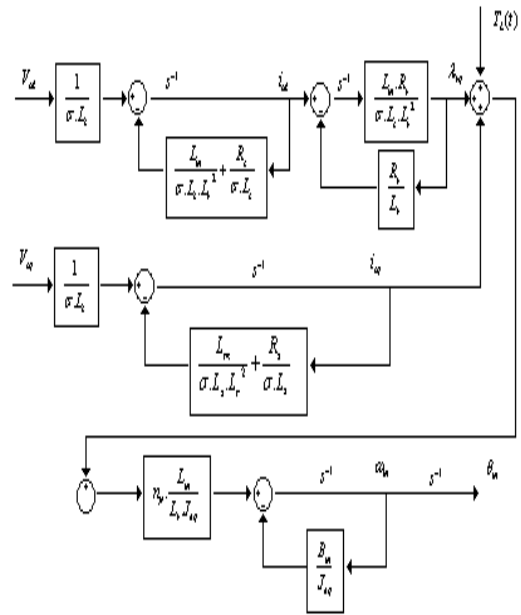
$$\times \frac{1}{\sigma \cdot L_s} - T_L(t) \dots\dots\dots (3.18)$$

Untuk memudahkan memperoleh diagram keadaan dan diagram blok dari persamaan di atas, maka perlu penyederhanaan terhadap vektor matriks di atas dengan mengambil bagian yang dianggap perlu dideskripsikan :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & \eta\beta \\ 0 & 0 & -\eta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_s}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r^2} - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r^2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \dots\dots\dots (3.19)$$

Sehingga, dari vektor matriks di atas didapatkan diagram keadaan motor induksi :



Gambar 3-3. Diagram Keadaan Motor Induksi (Zulfatman,14:jounal 2008).

3.5 Fungsi Alih dan Digram Blok Motor Induksi fasa tiga.

Sebagai sistem yang memiliki banyak masukan, dalam hal ini model (*d-q reference frame*) adalah $V_{sd}(t)$, $V_{sq}(t)$ dan $T_L(t)$. Maka untuk mendapatkan fungsi alihnya lebih rumit jika dibandingkan dengan sistem masukan tunggal. Seperti motor dc, kita hanya membandingkan antara $\omega_m(t)$ sebagai keluaran dengan $E_a(t)$ sebagai masukan acuan.

Demikian juga halnya dengan motor induksi, untuk mendapatkan fungsi alih, maka akan dibandingkan antara $\omega_m(t)$ sebagai keluaran dengan $V_{sd}(t)$ dan $V_{sq}(t)$ sebagai masukan dua koordinat orthogonal dan polar, *direct – quadrature (d-q)*. Untuk mendapatkan fungsi alih, maka salah satu dari tegangan acuan masukan dan $T_L(t)$ harus sama dengan nol. Dari persamaan (3.10) di atas :

$$(J_{eq}s + B_m) \cdot \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_L(t) \dots\dots\dots (3.20)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_{em}(s)}{(J_{eq}s + B_m)} = \frac{n_p \cdot L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r \cdot (J_{eq}s + B_m)} \dots (3.21)$$

Dari persamaan (3.13) :

$$V_{sd}(t) = n_p \cdot \beta \cdot \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \beta \cdot \lambda_{rd} + \gamma i_{sd}(t) + \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \sigma L_s$$

Jika β , η , dan γ disubstitusikan :

$$V_{sd}(t) = (n_p \omega_m(t) \lambda_{rq} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rd}) \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} + (\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} + \frac{R_s}{\sigma L_s}) i_{sd}(t) + \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \sigma L_s$$

$$V_{sd}(s) = n_p \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} + (\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma L_s s) i_{sd}(s)$$

.....(3.22)

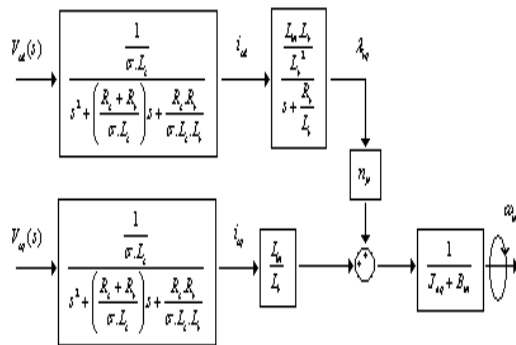
Maka, persamaan fungsi alih motor induksi adalah :

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq} s + B_m)} = \frac{n_p \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} + (\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma L_s s) i_{sd}(s)}{\frac{n_p L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r}}$$

$$J_{eq} \sigma L_s S^2 i_{sd}(s) + (R_s + \frac{L_m}{L_r}) i_{sd}(s) + \frac{R_r L_m}{L_r} \lambda_{rd} i_{sq}(s) + \frac{n_p^2 L_m^2}{L_r} (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))$$

.....(3.23)

Maka, dari fungsi alih seperti persamaan (3.23) diperoleh diagram blok motor induksi :



Gambar 3-4. Diagram Blok Motor Induksi

3.6 Data Motor Induksi Fasa tiga.

Jenis motor induksi yang akan digunakan pada pendesainan ini adalah motor jenis squerrel caqe (sangkar tupai). Agar dapat didesain maka harus diketahui terlebih dahulu nilai dari parameter-parameter yang dimiliki oleh motor induksi tersebut. Dengan spesifikasi fisis seperti Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3-1 Spesifikasi Fisis Motor Induksi Squerrel Caqe

v	Tegangan sumber terukur	220	Volt.
P	Jumlah pole	2	-
f _s	Frekuensi stator	50	Hz
J _{eq}	Momen inersia stator	0.3	Kg.m ²
R _s	Tahanan stator	0.024	Ohm
R _r	Tahanan rotor	0.022	Ohm
L _s	Induktansi stator	0.11	H
L _r	Induktansi rotor	1.76	H

L _m	Induktansi magnetic	0.178	H
S	Slip	0.02	-
B _m	Koefisien gesekan	-	N.m.detik
I _s	Arus Stator	2.3	Amper
N _s	Kecepatan sinkron	2780	Rpm
□	Cos □	0.83	

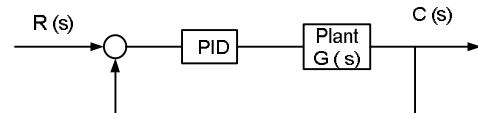
Nilai-nilai dari parameter ini kemudian akan disubstitusikan ke dalam bentuk sebuah fungsi alih dari persamaan (3.23) di atas sebagai fungsi alih motor induksi yang akan dilengkapi dan disempurnakan spesifikasi keluarannya dengan controller.

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{0.202}{0.184 s^2 + 0.025 s + 0.409}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{1.098}{s^2 + 0.136 s + 2.223} \dots\dots\dots(3.24)$$

3.7 Perancangan PID Kendali

Sistem secara lengkap yang terdiri dari plant dan sebuah kendali dapat digambarkan dengan diagram blok berikut :



Gambar 3-5. Sistem dengan Plant dan Kendali

Kendali yang digunakan dalam sistem untuk memperbaiki keluaran sistem, yaitu berupa controller PID. G(s) merupakan fungsi alih dari plant yang akan dikontrol, dalam hal ini adalah motor induksi. Namun yang perlu menjadi catatan dalam pendesainan PID Kendali adalah bahwa tidak selamanya komponen P (Proporsional), I (Integral), dan D (Diferensial) digunakan secara bersamaan. Ada kalanya hanya komponen P saja yang digunakan, PI, PD dan PID. Tergantung dari spesifikasi plant yang akan dikendali. Namun ketiganya saling berkaitan satu sama lain.

Untuk mempermudah kita memahami karakteristik dari masing-masing Kendali P, I dan D, dapat diuraikan pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 3- 2 Karakteristik Kendali P, I dan D

t _r	M _p	t _s	
Berkurang	Bertambah	Perubahan Kecil	Kp
Berkurang	Bertambah	Bertambah	Ki
Perubahan Kecil	Berkurang	Berkurang	Kd

Dari Tabel 3-2. di atas, sebuah Kendali Proporsional (Kp) akan berpengaruh pada berkurangnya waktu naik (t_r) dan error steady state (e_{ss}), bertambahnya lewatan maksimum (M_p) serta perubahan kecil pada waktu penetapan (t_s). Kendali Integral (Ki) akan berpengaruh pada tereliminasi error steady state (e_{ss}), berkurangnya waktu naik (t_r), dan bertambahnya waktu

penetapan (t_s) dan lewatan maksimum (M_p). Sementara itu Derivatif kendali (Kd) akan berpengaruh pada bertambahnya stabilitas sistem, mengecilnya lewatan maksimum (M_p) dan waktu penetapan (t_s), serta perubahan kecil pada waktu naik (t_r).

Pendesainan PID kendali pada dasarnya adalah untuk memperbaiki performansi spesifikasi keluaran sistem berupa waktu naik (t_r), waktu penetapan (t_s), waktu puncak (t_p), lewatan maksimum (M_p) dan error steady state (e_{ss}) menjadi kondisi mendekati ideal.

Dari pemodelan sistem didapatkan sebuah fungsi alih :

$$G_P(s) = \frac{1.098}{s^2 + 0.136s + 3.321}$$

Persamaan fungsi alih lup tertutupnya adalah :

$$G_P(s) = \frac{1.098}{s^2 + 0.136s + 4.419} \dots\dots\dots (3.25)$$

Persamaan karakteristik dari plant adalah :

$$s^2 + 0.136s + 4.419 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \dots\dots\dots (3.26)$$

Frekuensi alami tak teredam :

$$\omega_n = \sqrt{4.419} = 2.10 \text{ rad/det}$$

Rasio redaman : $0.136 = 2\zeta\omega_n$

$$\zeta = 0.0323$$

Performansi dari sistem loop tertutup tersebut adalah :

1) Waktu tunda (t_d)

$$t_d = \frac{1 + 0.7\zeta}{\omega_n} = 0.487 \text{ det.}$$

2) Waktu naik (t_r)

$$t_r = \frac{3.14 - 1.258}{2.10} = 0.896 \text{ det}$$

3) Waktu puncak (t_p)

$$t_p = \frac{3.14}{2.1 \sqrt{1-0.323^2}} = 1.496 \text{ det}$$

4) Waktu penetapan (t_s)

$$t_s = \frac{3}{0.323 \times 2.1} = 4.423 \text{ det}$$

5) Lewatan maksimum (M_p)

$$M_P = e^{-3.14 \times 0.323 / \sqrt{1-0.323^2}} = 0.3424$$

$$\times 100 \% = 34.24 \%$$

6) Kesalahan keadaan tunak ,

$$(e_{ss}) = \frac{2 \times 0.323}{2.1} = 0.308$$

Dengan plant dari persamaan (3.25) di atas :

$$G_P(s) = \frac{1.098}{s^2 + 0.136s + 4.419}$$

Spesifikasi sistem yang ingin dicapai adalah mengurangi *overshoot* , waktu turun dan mengurangi *error steady state*.

Untuk mewujudkan spesifikasi dari sistem di atas, maka akan dilakukan penggunaan pasangan-pasangan kendali yang paling mungkin dan paling baik keluarannya, untuk kemudian dipilih kira-kira kendali mana yang paling mungkin untuk digunakan.

PID kendali dipilih sebagai alternatif kendali untuk menutupi kelemahan dari masing-masing PD kendali dan PI. PD kendali memiliki kelebihan pada waktu naiknya (t_r) yang kecil, tetapi menghasilkan lewatan maksimum (M_p) yang lebih besar, sehingga tidak memenuhi spesifikasi sistem. Sebaliknya, PI kendali menghasilkan sinyal keluaran dengan waktu naik (t_r) lebih besar, akan tetapi memiliki lewatan maksimum (M_p) yang lebih baik dan memenuhi spesifikasi sistem.

Namun, jika spesifikasi sistem yang diinginkan sudah terpenuhi oleh salah satu pasangan kendali- waktu naik (t_r) dan lewatan maksimum (M_p) kecil – baik PD kendali, PI kendali atau PID kendali. Maka tidak diperlukan lagi tambahan kendali.

3.8 PD Kendali.

Fungsi alih sistem :

$$G_P(s) = \frac{1.098}{s^2 + 0.136s + 4.419}$$

Sementara fungsi alih lengkapnya :

$$G_P(s) = \frac{1.098 K (K_P + K_D s)}{s^2 + 0.136s + 4.419}$$

Untuk memenuhi nilai maksimum error steady state (e_{ss}) = 0.05, maka diperlukan K sebagai penguat. K harus di set pada 0.1.

Dengan demikian fungsi alih lup tertutup (*plant*) dengan PD kendali :

$$G(s) = \frac{1.098 \times 0.1 (K_P + K_D s)}{s^2 + (0.136 + 1.098 \times 0.1 K_D) s + (4.419 + 1.098 \times 0.1 K_P)}$$

$$G(s) = \frac{0.1098 (K_P + K_D s)}{s^2 + (0.01 + 0.1098 K_D) s + (4.419 + 0.1098 K_P)}$$

$$\dots\dots\dots (3.27)$$

Tetapan kesalahan kecepatan statis K_v didefinisikan sebagai: [2].

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = \frac{0.1098K_p}{0.136} = 0.8 K_p$$

Pembangkit kesalahan keadaan tunak dalam suku tetapan kesalahan kecepatan statis diberikan oleh:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} = \frac{1}{0.8K_p}$$

, K_p harus disesuaikan dengan e_{ss} sebesar 0.05, maka K_p diset sebesar 25.

Dengan persamaan karakteristik sistem pada kendali PD adalah :

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + (0.136 + 0.1098K_D)s + (4.419 + 0.1098K_p) \dots\dots\dots (3.29)$$

$$\omega_n^2 = 4.419 + 0.1098K_p \dots\dots\dots (3.30)$$

$$= 4.419 + 0.1098 \times 25$$

$$\omega_n = 2.676$$

Rasio redaman (ζ) system adalah

$$2\zeta\omega_n = (0.136 + 0.1098K_D) \dots\dots\dots (3.31)$$

$$\zeta = (0.025 + 0.02 K_D)$$

Selanjutnya K_D divariasikan sebagai fungsi kendali derivative pada kendali PD. Dengan pendekatan persamaan di atas, maka untuk mendapatkan spesifikasi sistem, yaitu redaman (ζ), waktu naik (t_r), waktu penetapan (t_s), waktu puncak (t_p), waktu tunda (t_d), lewatan maksimum (M_p) dan erroe steady state (e_{ss}) dilakukan perhitungan dengan $0 < \zeta < 1$. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 3-3 di bawah ini.

Tabel 3-3 Hasil perhitungan keluaran sistem dengan berbagai harga K_D .

No	ζ	K_D	t_r (det)	t_s (det)	t_d (det)	t_p (det)	M_p (%)	e_{ss}
1	1	48.75	∞	1.12	0.64	∞	1	0.75
2	0.9	43.75	2.31	1.25	0.61	0.12	0.15	0.67
3	0.7	33.75	0.43	1.60	0.56	1.64	4.61	0.52
4	0.47	22.5	0.87	2.39	0.49	1.33	18.78	0.35
5	0.25	11.5	0.70	4.48	0.44	1.21	44.45	0.19
6	0.15	6.25	0.65	7.47	0.41	1.19	62.10	0.11
7	0.09	3.25	0.62	12.45	0.40	1.18	75.29	0.06
8	0.07	2.25	0.60	16.01	0.39	1.16	80.22	0.05

Untuk melihat hasil perancangan simulasi tabel 3-3 di atas lalu dibuatlah kedalam simulink MATLAB. Selanjutnya pada tabel 3-4 adalah hasil perancangan dengan PID pada berbagai macam K_I , karena K_p dan K_D sudah ditentukan sebelumnya.

Tabel 3-4 Hasil perhitungan keluaran sistem dengan berbagai harga K_I .

No	ζ	K_i	t_r (det)	t_s (det)	t_d (det)	t_p (det)	M_p (%)	e_{ss}
1	1	1.2	∞	1.12	0.64	∞	1	0.75
2	0.9	1.09	2.31	1.25	0.61	0.12	0.15	0.67
3	0.7	0.85	0.43	1.60	0.56	1.64	4.61	0.52
4	0.47	0.56	0.87	2.39	0.49	1.33	18.78	0.35
5	0.25	0.35	0.70	4.48	0.44	1.21	44.45	0.19
6	0.15	0.18	0.65	7.47	0.41	1.19	62.10	0.11
7	0.09	0.11	0.62	12.45	0.40	1.18	75.29	0.06
8	0.07	0.08	0.60	16.01	0.39	1.16	80.22	0.05

Sama seperti yang dilakukan pada tabel 3-3 untuk melihat hasil perancangan simulasi tabel 3-4 di atas lalu dibuatlah kedalam simulink MATLAB.

Berdasarkan hasil tabel diatas terdapat beberapa perbedaan karakteristik sistem kendali yang dimiliki oleh kendali PID dan PD. Rasio redaman ζ system terjadi perubahan yaitu pada kendali PID terjadi redaman kritis hal ini system akan mengalami tidak adanya osilasi dan pada PD tanggapan tidak muncul.

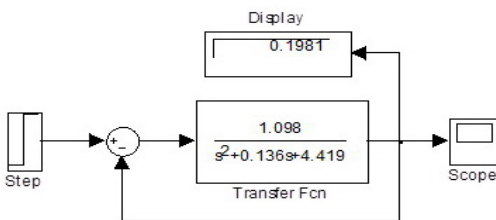
Spesifikasi sistem antara sistem tanpa PID controller dengan spesifikasi sistem yang memiliki PID controller. PID controller (dalam hal ini PD controller) mampu memperbaiki waktu puncak (t_r), lewatan maksimum (M_p) dan waktu penetapan (t_s). Walaupun waktu tunda (t_d) mengalami kenaikan, namun tidak jauh meleset dari spesifikasi sistem yang diinginkan. Karena perubahan spesifikasi sistem yang paling diinginkan adalah berkurangnya waktu naik (t_r), lewatan maks. (M_p) yang kecil, dan lebih pendeknya waktu penetapan (t_s). Berkurangnya waktu naik (t_r) berarti semakin cepatnya waktu yang diperlukan oleh motor induksi untuk mencapai garis kondisi stabil dari kondisi start atau saat terjadi pertambahan beban atau gangguan dari kondisi stabil. Rendahnya presentase lewatan maksimum (M_p) menandakan bahwa motor induksi tidak memerlukan daya (catu) terlalu besar untuk mencapai kondisi stabil. Demikian juga halnya dengan berkurangnya waktu penetapan (t_s) merupakan gambaran bahwa motor induksi memiliki waktu yang lebih pendek untuk mencapai kondisi steady state.

Oleh karena itu, dalam desain ini unsur I (integral) dianggap tidak terlalu penting untuk diikutsertakan sebagai bagian dari PID controller untuk

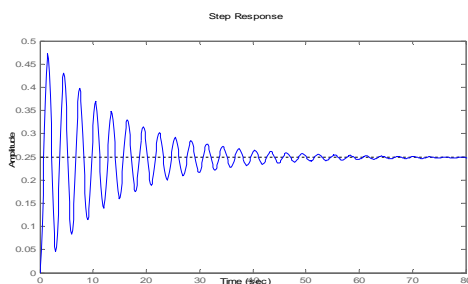
sistem motor induksi. Ternyata unsur P (proporsional) dan D (diferensial) sudah cukup memenuhi tuntutan untuk memenuhi spesifikasi sistem yang diinginkan. Karena pada dasarnya P dan D kontroller mampu memperpendek waktu naik (t_r), memenuhi kewajaran presentase lewatan maksimum (M_p) untuk motor induksi dan mempercepat pencapaian titik kestabilan sistem atau waktu penetapan (t_s).

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Gambar simulink 4-1 dan hasilnya pada gambar 4-2 ini belum diberi kendali, baik PID maupun kendali PD. Hasil simulasi simulink tanpa kendali PID dan PD parameter motor induksi



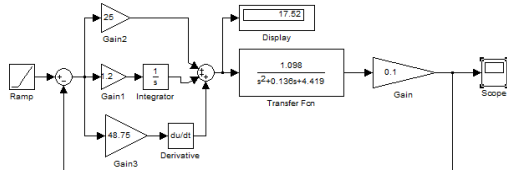
Gambar 4-1 Simulasi simulink fungsi alih motor induksi tanpa kendali PID dan PD



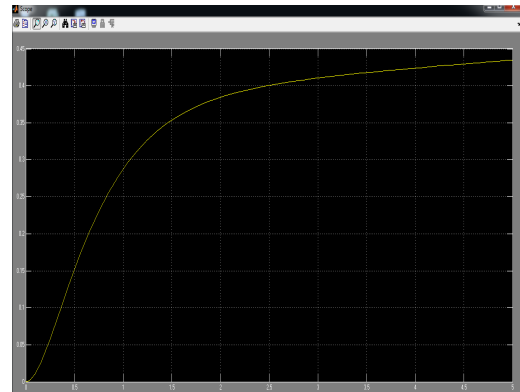
Gambar 4-2 Hasil keluaran gambar 4-1 simulink fungsi alih motor induksi tanpa kendali PD dan PID

4.2. Keadaan saat diberi kendali PID.

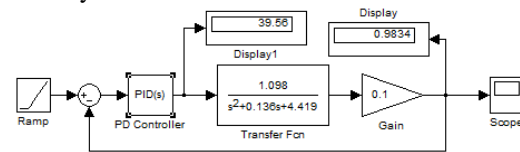
Dari data hasil perhitungan, maka tabel 3-4 dapat dibuatkan dalam simulasi di simulink MATLAB. Pada gambar 4-3 adalah hasil rancangan dengan harga K_p didapat 25 dan harga $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$, dimana hasil dirancang sendiri dengan satu kendali P, satu kendali I dan satu kendali D yang diparalel.



Gambar 4-3 Simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$



Gambar 4-4 Hasil keluaran gambar 4-3 simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$ Pada gambar dibawah ini yaitu gambar 4-5 PID adalah berasal dari MATLAB yang diambil dari simulink library.

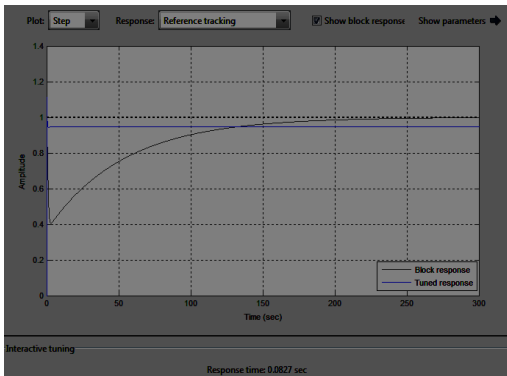


Gambar 4-5 Simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$

Selanjutnya rangkaian gambar tersebut dapat dilihat hasilnya seperti pada gambar 4-6 dibawah ini.



Gambar 4-6 Hasil keluaran gambar 4-5 simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$ Kemudian juga dilakukan tuning terhadap kendali PID tersebut agar hasilnya makin baik dibandingkan dengan gambar 4-6, seperti pada gambar 4-7 dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 4-7 Hasil tuning pada Matlab dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$.

Pada gambar terlihat bahwa respon time didapat sebesar 0.0827 detik yang berarti interaktif tuning lebih cepat dari pada hasil pada gambar 4-6. Sedangkan pada tabel 4-1 waktu naik (t_r) hasil tuning sebesar 0.0528 detik, sehingga didapat overshoot didapat sebesar 11.5 persen. Sedangkan waktu puncak dari kedua hasil gambar tersebut tidak berjauhan ,yaitu dari 0.999 detik menjadi 1.11 detik yang mengakibatkan kedua hasil seperti berhimpit disumbu vertikal.

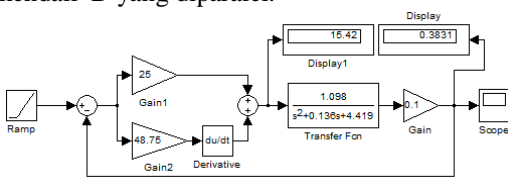
Tabel 4-1 Hasil tuning pada Matlab dengan $K_p=25$, $K_i=1.2$ dan $K_d=48.75$.

Controller parameters		
	Tuned	Block
P	517.4277	25
I	99.0965	1.2
D	230.6923	48.75
N	51.3256	1309.3534

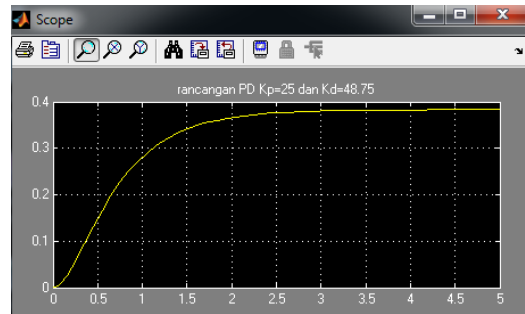
Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time (sec)	0.0528	99
Settling time (sec)	NaN	185
Overshoot (%)	11.5	0
Peak	1.11	0.999
Gain margin (db @ rad/sec)	Inf @ Inf	Inf @ Inf
Phase margin (deg @ rad/sec)	60 @ 24.2	86.4 @ 6.1
Closed-loop stability	Stable	Stable

4.3. Keadaan saat diberi kendali PD.

Pada gambar 4-8 adalah hasil rancangan dengan harga K_p didapat 25 dan harga $K_d= 48.75$, dimana hasil dirancang sendiri dengan satu kendali P, dan satu kendali D yang diparalel.

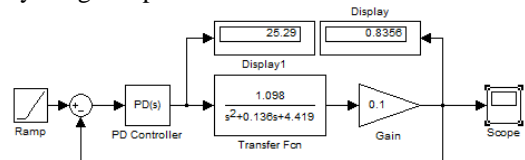


Gambar 4-8 Simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, dan $K_d=48.75$



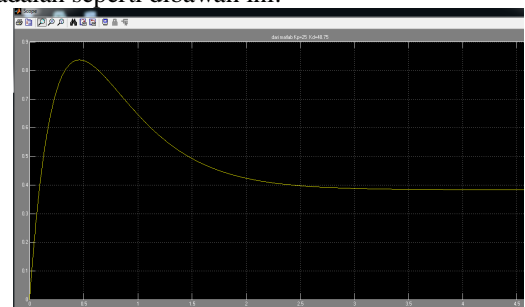
Gambar 4-9 Hasil keluaran gambar 4-8 simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, dan $K_d=48.75$.

Pada gambar dibawah ini yaitu gambar 4-10 PD adalah berasal dari MATLAB yang diambil dari simulink library dengan K_p25 dan $K_d 48.75$



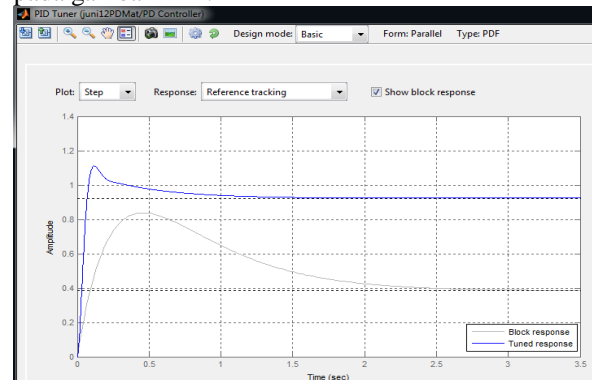
Gambar 4-10 Simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, dan $K_d=48.75$

Hasil simulasi simulink dari MATLAB library gambar 4-10 adalah seperti dibawah ini.



Gambar 4-11 Hasil keluaran gambar 4-10 simulasi simulink fungsi alih motor induksi menggunakan kendali PID dengan $K_p=25$, dan $K_d=48.75$.

Dari matlab kemudian diperbaiki lagi dimana gambar 4-11 setelah melalui tuning kendali PD didapat seperti pada gambar 4-12.



Gambar 4-12 Hasil tuning Matlab pada $K_p=25$ dan $K_d=48.75$.

Tabel 4-2. Hasil tuning dari matlab terhadap kendali PD

Controller parameters		
	Tuned	Block
P	479.1782	25
I		
D	232.0655	48.35
N	50.3833	1309.3534

Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time (sec)	0.0473	0.0714
Settling time (sec)	0.965	2.72
Overshoot (%)	20.4	118
Peak	1.11	0.837
Gain margin (db @ rad/sec)	Inf @ Inf	Inf @ Inf
Phase margin (deg @ rad/sec)	60 @ 24.2	86.3 @ 6.06
Closed-loop stability	Stable	Stable

Pada gambar 4-12 dan tabel 4-2 diatas terlihat bahwa dari perhitungan plant dan berdasarkan uji coba kendali PD, dimana $K_p = 25$ dan $K_D=48.75$ telah diperbaiki menjadi $K_p=479.1782$ dan $K_D= 232.0655$. Begitu juga waktu naik (t_r) dari 0.0714 berubah menjadi 0.0473 dan waktu penetapan (t_s) dari 2.72 diperbaiki menjadi 0.965. Persen *overshoot* yang menunjukkan kestabilan relatif mengalami perubahan dibawah 25 persen, yakni sebesar 20.4 persen.

Tabel 4-3 Data hasil pengujian motor induksi dengan kendali PD di MATLAB , $K_p=25$, $K_d=48.75$.

No	N (rpm)	I _r (amp)	I _s (amp)	T _L (N.m)	T _e (N.m)	V _{rms} (volt)
1	1800	1.658	6.875	0	3.15	280.1
2	1798	0.5776	6.797	0.5	2.653	280.1
3	1796	0.4321	6.72	1	2.156	280.1
4	1788	1.481	6.43	3	0.1655	280.1
5	1772	0.5882	5.92	7	3.836	280.1
6	1759	2.537	5.601	10	6.873	280.1

Gambar hasil keluaran pengujian dari tabel 4-3 diatas menggunakan MATLAB dengan $K_p=25$ dan $K_d=48.75$ dengan torsi beban yang berbeda.

Dari tabel 4.3 diatas torsi beban dibuat bervariasi dan tegangan dijaga tetap konstan sebesar 280.1 volt rms, dimana bila torsi dinaikkan ,maka kecepatan motor juga mengalami perubahan dan arus rotor juga naik, tetapi arus stator tidak banyak berubah, sehingga rata-rata berkisar sebesar 6.3755 amper.

Tabel 4-4 Data hasil pengujian motor induksi dengan kendali PID diMATLAB , $K_p=25$, $K_i=1.2$, $K_d=48.75$:

No	N (rpm)	I _r (amp)	I _s (amp)	T _L (N.m)	T _e (N.m)	V _{rms} (volt)
1	1800	1.649	6.876	0	3.164	280.1
2	1798	0.5777	6.797	0.5	2.653	280.1
3	1796	0.432	6.72	1	2.156	280.1

4	1788	1.481	6.429	3	0.1654	280.1
5	1772	0.5879	5.919	7	3.836	280.1
6	1755	4.249	5.508	10	7.897	280.1

Pada tabel 4-4 hasil pengujian dengan MATLAB, gambar hasil data tersebut dengan menggunakan kendali PID dimana torsi beban dimulai dari nol dan dibuat acak agar didapat hasil perubahan kecepatan dan tegangan tidak mengalami penurunan. Dari data tabel 4-3 dan 4-4 , ternyata pada kendali PID bila torsi beban semakin membesar kecepatan akan mengalami penurunan, akan tetapi pada kendali PD dengan torsi beban yang sama, maka kecepatan tidak terlalu menurun.

4.4. Analisa Pemilihan Kendali PID atau PD.

Setelah melakukan perhitungan dengan cara uji trial and error pada kendali dan juga menyangkut respon transien. Percobaan yang telah dilakukan pada matlab simulink , penulis dapat menganalisa ada yang harus diperhatikan lebih jauh tentang pengaruh kendali PID dan PD terhadap motor induksi fasa tiga. Motor induksi ini dioperasikan dengan cara mendisain kedalan bentuk persamaan tranfer function. Degan adanya matlab simulink yang dapat mentuning langsung dari apa yang telah ditrial and error. Hasil tuning tersebut kemudian dijadikan dasar pemilihan kendali yang cocok.

Pada saat melakukan trial and error harga $K_p 25$ dan $K_d 48,75$ ini pada kendali PD dan kendali PID didapat $K_p 25$. $K_i 1.2$ dan $K_d 48.75$ ini didapat dari hasil tuning dari Matlab. Oleh karena itu didapatlah harga t_r rata-rata 0.88 dan pada blok simulink $t_r 99$, lalu hasil tuning didapat $t_r 0.0528$. Untuk harga t_s rata-rata 5.85 dan pada blok simulink didapat 185 dan tidak ditemukan bila dituning. Harga overshoot pada blok 0 % dan dituning didapat 11.5. Waktu puncak dari blok didapat 0.999 dan setelah dituning 1.11. Pada kendali PD didapat t_r sebesar 0.0473, t_s 0.965, dan overshoot 20.4 % ini terjadi pada tuning dan pada blok didapat $t_r 0.0714$, t_s 2.72, overshoot 118 % dan waktu puncak sebesar 0.837. Dengan berpedoman pada harga tersebut maka, kendali PID dapat memperbaiki respon transien, menghilangkan error steady state dan memperbaiki efek redaman. Hal yang terjadi pada kendali PD dapat mengurangi overshoot, mengurangi waktu turun dan memperbaiki waktu naik, tetapi erorr tak banyak berubah, mengurangi maksimum overshoot.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan:

Sebagai penutup hasil akhir dari pembuatan tesis ini dapat menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemodelan motor induksi fasa tiga dapat diterapkan pada kendali PID maupun PD berdasarkan pemilihan simulasi Matlab simulink dan penerapang tuning Matlab.

2. Dalam penelitian ini sistem kendali PID dan PD perbedaan ditinjau dari overshoot dimana pada kendali PD sebelum dituning 124 % dan setelah dituning menjadi 20,11 %, waktu penetapan, t_s sebelum dituning 3,32 detik dan setelah dituning 0,965 detik, waktu naik, t_r sebesar 0,0616 detik sebelum dituning, setelah itu menjadi 0,0473 detik. Untuk kendali PID waktu naik t_r sebelum dituning 0,0168 detik dan setelah itu menjadi 0,0528 detik dan overshoot sebelum dituning 2,44 menjadi 11,5.
3. Dari hasil respon dipilih respon PD lebih baik dari pada respon PID, sebab ditinjau dari lewatan (*overshoot*) pada PD sebesar 20,4 % dan waktu naiknya pun diperbaiki menjadi 0,0473 detik.
4. Dari hasil pengujian pada tabel 4-2 dan tabel 4-5 terlihat tegangan V_{rms} pada kendali PD dan PID sebesar 280,1 volt. Tetapi pada kecepatan motor induksi fasa tiga didapat tidak berubah banyak walaupun torsi beban bertambah.

5.2 Saran:

Setelah penulis menganalisa dan melihat hasil, maka ada beberapa saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Pemodelan motor induksi yang mempunyai hasil fungsi alih kiranya dapat dilanjutkan agar dicapai tanggapan keluaran yang lebih baik.
2. Dalam hal kendali penulis masih melakukan trial and error karena spesifikasi sistem sulit untuk mencapai daerah waktu dan perlu kiranya untuk dimodifikasi selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AliMuhamad, *Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software MATLAB*, Jurnal Edukasi@Elektro, volume.1, no.1, Oktober, 2004.
- [2] Chi-Hsu Wang, *Control System Simulation, Part I*, Departemen of Electrical Engineering National Chiao Tung University Hsinchu, Taiwan, 2011.
- [3] Gopal M, *Control Systems, Principles And Design*, International Edition, ISBN 0-07-123127-7, second edition, 2003.
- [4] Isnanto Heru Purnomo, *Analisis Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Kerangka Referensi*, Journal, email: Isheru@yahoo.com, 2010
- [5] Iwan Setiawan, *Kontrol PID Untuk Proses Industri*, ISBN: 9792741003, Eleksmedia Komputindo, 2008.
- [6] K.S. Shandhu and Vivek Pahwa, *Simulation Study OF Three Phase Induction Motor With Variations In Moment Of Inertia*, Journal, ARPN of Engineering and Applied Sciences, vol.4, No.6, August 2009.
- [7] K.L Shi, T.F. Chan, Y.K. Wong and S.L. HO, *Modelling And Simulation Of the Three Phase Induction Motor Using Simulink*, Journal, Vol.36, pp.163-172, Manchester U.P., 1999.
- [8] Malleshham, *Improvement in Dynamic Response of Electrical Machines with PID and Fuzzy Logic Based Controllers*, journal, IEEE, K.B Venkata Ramana, San Francisco, USA, 2007.
- [9] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik I Edisi Kedua* (alih bahasa Edi Laksono), Erlangga, Jakarta, 1996.
- [10] Putri Ika Ratna, *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Kontroler PID Metode Ziegler-Nichols*, journal, 2008.
- [11] Steven T. Karris, *Introduction to Simulink, with Engineering Applications*, Orchard, 2006.
- [12] Rijono Yon, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, ISBN 979-533-816-1, Andi Offset, Yogyakarta, 2002.
- [13] Zuhail, *Prinsip Dasar Elektroteknik*, PT. Gramedia Pustaka, Jakarta, 2004.
- [14] Zulfatman, *Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Phase*, Journal, 2008.
- [15] Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, ISBN 979-8001-57-5, ITB, 1991.