

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI Tiga Fasa DENGAN TEKNIK ARTIFICIAL INTELEGENT BERBASIS VEKTOR KONTROL

Muh. Ali Anang Lubis, Gigih Prabowo , Arman Jaya , Era Purwanto
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telf: +6285755583598, Fax: -, Email: rlians@student.eepis-its.edu

Abstrak

Motor induksi tiga fasa memiliki kelemahan pada pengontrolan kecepatannya yang hanya bergantung pada frekwensi input, tetapi hal ini bisa diatasi dengan teknologi inverter. Pengaturan torsi pada sebuah motor induksi dengan ripple yang rendah dan bentuk respon transient dan steady state yang baik adalah kriteria utama dari desain kontroler ini. Pertama kali menggunakan PI kontroler untuk mendapatkan parameter ini tetapi dengan ketentuan tertentu. Gain/penguatan tidak dapat ditingkatkan di luar dari limit tertentu, sehingga dibutuhkan respon yang lebih baik. Dengan adanya teknik Artificial Intellegent, kekurangan ini dapat dikurangi. Salah satu teknikny adalah menggunakan logika Fuzzy sebagai setting dari nilai parameter kontroler PI-nya. Elemen-elemen kontroler PI-Fuzzy masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mengatasi permasalahan yang terjadi seperti saat start motor, kondisi tanpa beban dan keadaan motor berbeban. Metode ini menggunakan setting arus dan tegangan serta sensor kecepatan pada close loop untuk perhitungan Vektor Kontrolnya. Kontroler dalam metode ini didesain untuk mengkontrol kecepatan motor yang digunakan dalam vektor kontrol untuk analisa motor induksi dinamik. Hasil akhir diperoleh dari model kontroller PI-Fuzzy dengan perhitungan Vektor Kontrol sebagai pengaturan kecepatan motor . Diharapkan dengan kontroler PI-Fuzzy dengan Vektor Kontrol dapat memperbaiki dan memperkecil ripple pada torsi motor dan arus stator. Hal ini juga dapat mempermudah pembatasan magnitude dari torsi dan nilai arus dalam range yang spesifik pada beberapa macam gangguan.

Kata Kunci: Kontroler PI-Fuzzy, Inverter, Motor Induksi, Vector Control, Artificial Intelligent

1. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa saat ini sering digunakan pada industri dengan berbagai aplikasi. Hal ini disebabkan karena motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keunggulan diantaranya tidak ada kontak antara stator dan rotor kecuali bearing, tenaga yang besar, daya listrik rendah dan hampir tidak ada perawatan, tetapi memiliki beberapa kelemahan diantaranya pengontrolan kecepatan hanya bergantung pada frekwensi input sedangkan sumber yang ada memiliki frekwensi yang konstan. Untuk mengubah frekwensi input lebih sulit dibanding dengan mengubah tegangan input.. Dengan ditemukannya teknologi inverter maka hal tersebut menjadi mungkin untuk dilakukan.

Pengaturan torsi pada sebuah motor induksi tanpa nilai overshoot yang tinggi dan ripple yang rendah dengan bentuk respon transient dan steady state yang baik adalah kreteria utama dari desain kontroler sistem ini. Pertama kali menggunakan PI kontroller untuk mendapat parameter ini tetapi dengan ketentuan tertentu. Penguatan tidak dapat ditingkatkan diluar dari harga nilai tertentu, sehingga dibutuhkan respon yang lebih baik. Selain itu memasukkan ke non-linieritas ke dalam sistem yang membuat analisisnya lebih kompleks dan juga dapat memperburuk performa dari kontroller.

Dengan adanya teknik Artificial Intellegent, kekurangan ini dapat dikurangi. Salah satu teknikny adalah menggunakan logika Fuzzy sebagai setting dari nilai parameter kontroler PI-nya. Elemen-elemen kontroler PI-Fuzzy masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mengatasi permasalahan yang terjadi seperti saat start motor, kondisi tanpa beban dan keadaan motor berbeban. Metode ini menggunakan setting arus

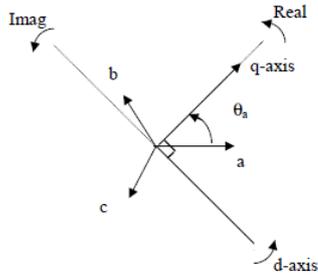
dan tegangan serta sensor kecepatan pada close loop untuk perhitungan Vektor Kontrolnya. Kontroler dalam metode ini didesain untuk mengkontrol kecepatan motor yang digunakan dalam vektor kontrol untuk analisa motor induksi dinamik. Hasil akhir diperoleh dari model kontroller PI-Fuzzy dengan perhitungan Vektor Kontrol sebagai pengaturan kecepatan motor . Diharapkan dengan kontroler PI-Fuzzy dengan Vektor Kontrol dapat memperbaiki dan memperkecil ripple pada torsi motor dan arus stator. Hal ini juga dapat mempermudah pembatasan magnitude dari torsi dan nilai arus dalam range yang spesifik pada beberapa macam gangguan.

Untuk mengkontrol kecepatan motor induksi 3-fasa melalui Vector Kontrol dengan teknik Artificial Intellegent ini adalah menggunakan Mikrokontroler ATmega128 dengan input set point menggunakan keypad sebagai setting input dari Kontrol PI-Fuzzy sebagai kontrol pengaturan kecepatan motornya. Estimasi dari Kontrol ini didapatkan dari sensing arus dan tegangan dari keluaran Inverter 3-fasa serta respon kecepatan yang didapat dari sensor kecepatan menggunakan Proximity switch dengan rangkaian magnetic pickup.

2. DASAR TEORI

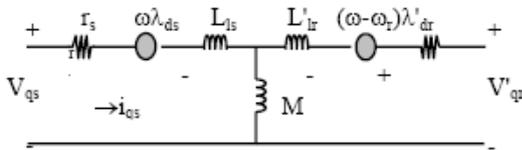
2.1 Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa yang simetris jika ditinjau dalam rangkaian rotor yang berputar. Rangkaian stator digambarkan sepanjang sumbu-sumbu a_s , b_s dan c_s . Sedangkan rangkaian rotor digambarkan sepanjang sumbu-sumbu a_r , b_r dan c_r seperti terlihat pada Gambar 1.

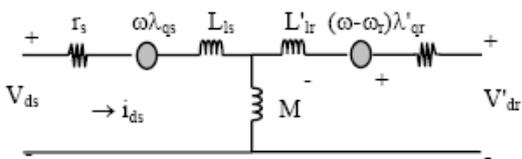


Gambar 1. Stator dan rotor dari motor induksi pada frame referensi

Masing-masing persamaan sumbu stator dan rotor dikombinasi dalam persamaan sumbu $d-q$ dan menghasilkan rangkaian pengganti motor induksi dalam sumbu d dan sumbu q sebagai berikut :



Gambar 2. Rangkaian pengganti motor induksi tiga fasa sumbu d



Gambar 3. Rangkaian pengganti motor induksi tiga fasa sumbu q

Sehingga nilai torsi elektromagnetik dapat ditentukan melalui persamaan :

$$T_{em} = \frac{3p}{22} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \dots \dots \dots (1)$$

2.2 Prinsip Dasar Vektor Kontrol

Vektor kontrol adalah suatu metode pengaturan kumparan medan pada motor induksi, dimana dari sistem *coupling* dirubah menjadi sistem *decoupling*. Dengan sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, sehingga torsi dan fluks juga dapat diatur secara terpisah, seperti halnya motor dc. Implementasi flux vektor pada motor induksi tiga fasa membutuhkan perhitungan/simulasi pada orientasi stator, rotor dan torsi. Untuk memudahkan simulasi motor dari kondisi transient sampai stabil, maka koordinat abc pada motor diubah ke dalam model bayangan/vektor ke bentuk dq (direct, quadrature).

Persamaan untuk transformasi abc ke dq , adalah :

$$i_{ds} = \text{Re}[\bar{i}_s] = \text{Re} \left[\frac{2}{3} (ia + aib + a^2 ic) \right] = \frac{2}{3} \left(ia - \frac{1}{2} ib - \frac{1}{2} ic \right) \quad (2)$$

$$i_{qs} = \text{Im}[\bar{i}_s] = \text{Im} \left[\frac{2}{3} (ia + aib + a^2 ic) \right] = \frac{1}{\sqrt{3}} (ib - ic) \quad (3)$$

Sehingga persamaan terakhir torsi adalah :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (4)$$

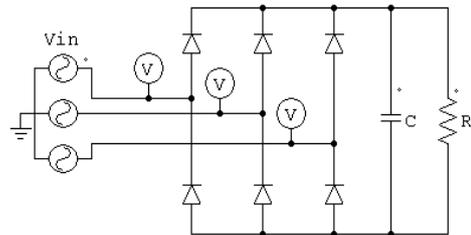
Dimana :

$$\phi_r = \phi_{rd} + j \phi_{rq}; \text{ apabila } \phi_{rq} = 0 \quad (5)$$

$$\text{maka } \phi_r = \phi_{rd}$$

2.3 Penyearah Tiga Fasa

Rangkaian rectifier tiga fasa dan enam buah diode yang dapat mengubah tegangan tiga fasa menjadi tegangan DC. Rangkaianannya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4 berikut :

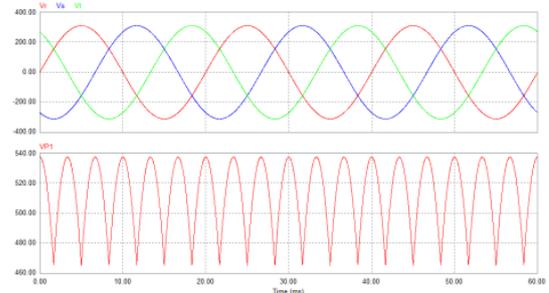


Gambar 4. Rangkaian rectifier tiga fasa.

Untuk menentukan tegangan keluaran dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_m = \sqrt{2} \times V_s \quad (6)$$

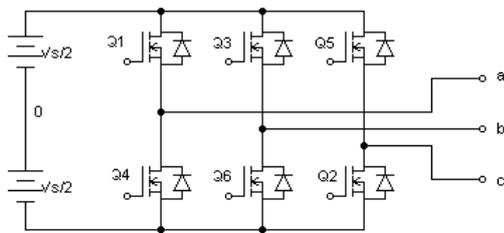
$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_m \quad (7)$$



Gambar 5. Gelombang V_{input} dan V_{output} rectifier.

2.4 Inverter Tiga Fasa

Konverter DC ke AC dinamakan inverter. Fungsi sebuah inverter adalah mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC simetris dengan besar dan frekwensi yang diinginkan. Tegangan outputnya bisa tertentu dan bisa juga diubah-ubah dengan frekwensi tertentu atau frekwensi yang diubah-ubah. Tegangan output variabel didapat dengan mengubah-ubah tegangan input DC agar gain inverter konstan. Disisi lain, apabila tegangan input DC adalah tertentu dan tidak bisa diubah-ubah, bisa didapatkan tegangan output yang variabel dengan mengubah-ubah gain dari inverter. Gain inverter didefinisikan sebagai rasio tegangan output AC terhadap tegangan input DC.

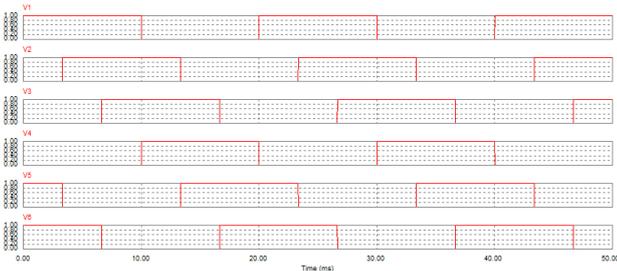


Gambar 6. Rangkaian inverter tiga fasa.

Rangkaian inverter ini terdiri dari enam buah piranti switching (MOSFET) yang bekerja secara berpasangan dan bekerja (on-off) secara bergantian. Maka membutuhkan enam buah pulsa yang bekerja on-off secara bergantian. Rangkaian dasar *Three Phase Full Bridge Inverter* pada Gambar 6, didesain untuk menghasilkan tegangan 380 Vac dan arus 3 Ampere. Untuk memenuhi keadaan tersebut, piranti yang sesuai untuk *Three Phase Full Bridge Inverter* ini menggunakan MOSFET tipe IRFP 460. MOSFET ini memiliki kemampuan switching diatas 50 KHz, batas kemampuan tegangan drain-source sampai 500 V dan arus drain ID 20 Ampere.

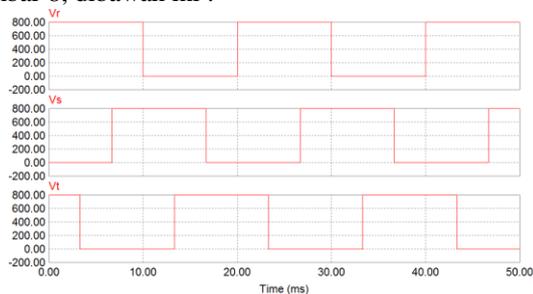
Untuk menentukan tegangan keluaran dari inverter dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_{out} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \quad (8)$$



Gambar 7. Pulsa switching untuk inverter.

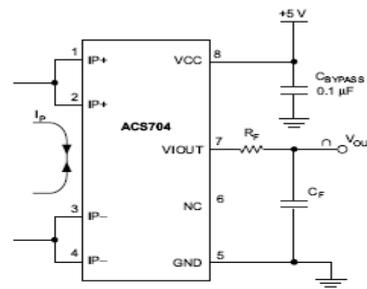
Dengan simulasi menggunakan sudut switching 180° untuk inverter seperti pada gambar 7 diatas, maka dihasilkan pulsa keluaran dari inverter seperti pada gambar 8, dibawah ini :



Gambar 8. Pulsa Keluaran Inverter.

2.5 Sensor Arus

Untuk sensor arus digunakan IC ACS 712 yang dapat membaca nilai arus hingga 5 Ampere. Output dari sensor arus ini berupa tegangan yang proporsional dengan nilai arus input yang dibaca, dengan sensitivitas 185 mV/A.



Gambar 9. Skematik sensor arus ACS 712.

2.6 Sensor Tegangan

Sensor tegangan menggunakan resistor pembagi tegangan dipasang secara paralel antara fasa dan netral. Fungsi resistor ini adalah untuk menurunkan tegangan dari tegangan sumber menjadi tegangan yang dikehendaki.

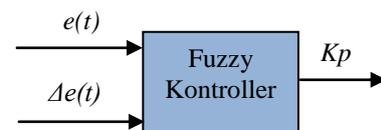
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (9)$$

2.7 Perancangan Kontroler PI-Fuzzy

Kontroler PI-Fuzzy merupakan kombinasi dari tiga jenis kontroler. Jika masing-masing dari ketiga jenis kontroler tersebut berdiri sendiri maka hasil yang dicapai kurang bagus, sebab masing-masing memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing. Dikombinasikannya ketiga jenis kontroler tersebut menjadi satu sistem kontrol tunggal, diharapkan mampu memberikan kontribusi dari kelebihan masing-masing.

Kontroler PI-Fuzzy bekerja dengan cara menerima sinyal dari sensor sebagai output dari plant yang dikontrol. Sinyal ini berupa sinyal output yang kemudian dibandingkan dengan setpoint dan menghasilkan error (selisih setpoint dengan output). Proses perbandingan antara harga error dilakukan sehingga menghasilkan delta error (selisih antara error sekarang dan terdahulu). Proses *fuzzyfikasi* dilakukan dengan menyusun membership function dari error dan delta error.

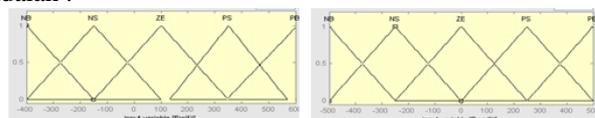
Adapun Blok diagram kontroler Fuzzy adalah sebagai berikut :



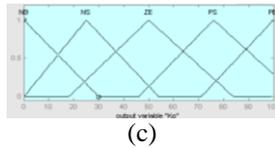
Gambar 10 Blok diagram kontroler fuzzy

Output dari kontroler masih berupa variabel fuzzy untuk itu perlu dilakukan proses *defuzzyfikasi* untuk mengubah variabel fuzzy menjadi variabel linguistik. Output dari kontroler yang telah *didefuzzyfikasi* digunakan untuk menentukan nilai dari parameter-parameter Kp. Fungsi fuzzy logic kontroler adalah untuk mengatur parameter PI secara otomatis.

Adapun membership function dari kontroler ini, adalah :



(a) (b)



(c)

Gambar 11. Membership function untuk input error, input delta error dan output

Kontrol proporsional adalah suatu penguat linier yang dapat diatur penguatannya. Hubungan antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah kecepatan motor induksi, maka pada penelitian ini dikembangkan suatu metode kontrol field oriented.

$$m(t) = K_p e(t) \dots\dots\dots (2.55)$$

Dengan : K_p adalah gain proporsional
 $m(t)$ adalah keluaran kontrol
 $e(t)$ adalah sinyal kesalahan

Kontrol proporsional integral adalah merupakan perubahan dari keluaran kontrol integral $m(t)$, berubah dengan fungsi waktu yang sebanding dengan sinyal kesalahan. Hubungan antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah :

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots (2.56)$$

Dengan : K_p adalah gain proporsional
 T_i adalah time integral

Tetapan waktu integral T_i mengatur aksi kontrol integral, sedangkan K_p memperkuat bagian proporsional maupun bagian integral dari aksi kontrol. Kebalikan dari tetapan waktu integral T_i disebut laju reset. Laju reset adalah banyaknya pengulangan bagian proporsional dari aksi pengontrolan per detik. Kontrol proporsional derivatif didefinisikan sebagai :

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (2.57)$$

Dengan: K_p adalah gain proporsional
 T_d adalah tetapan waktu derivative

2.11.1 Desain Rule Base

Proses ini berfungsi untuk mencari suatu nilai fuzzy output dari nilai fuzzy input. Prosesnya adalah suatu nilai fuzzy input dimasukkan kedalam sebuah rule yang telah dibuat kemudian dijadikan fuzzy output. Sebagai contoh aturan-aturan fuzzy adalah :

- If Error = NB and Delta error = NB then $K_p = NB$
- If Error = NS and Delta error = PS then $K_p = ZE$
- If Error = PS and Delta error = NB then $K_p = NS$

Ada beberapa operator yang digunakan dalam fuzzy, antara lain *and*, *or* dan *not*. Dalam proyek akhir ini menggunakan operator *and* maka input terkecil yang diambil, misal *if error = -100(NB) and Derror = -100(NB) then $K_p = 0$ (NB)* nilai fuzzy output dari nilai diatas adalah 0. Nilai -100 diambil dari membership function input dengan cara menarik garis lurus vertikal yang

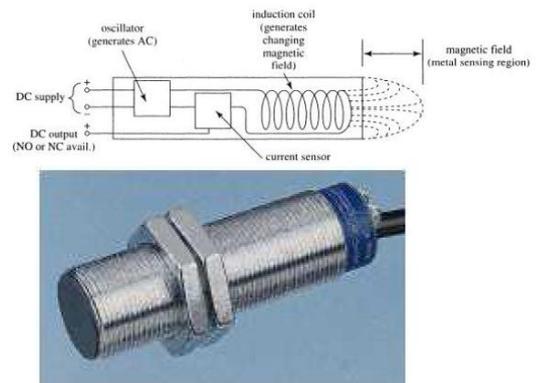
diinginkan. Aturan-aturan (rule) mengikuti perilaku umum sistem dan ditulis dalam pola label linguistic fungsi keanggotaan. Untuk dua input yaitu Error dan Delta Error dan satu sistem output, aturan (rule) tersebut dapat ditulis dalam bentuk matriks seperti tabel di bawah.

Tabel 1 Rule base kontrol logika fuzzy

Derr Error	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

2.8 Sensor Kecepatan Proximity

Inductive Proximity Sensor Proximity sensing adalah teknik pendeteksi dari keberadaan suatu objek dengan noncontact sensor elektronik. Inductive proximity sensor digunakan sebagai pengganti limit switch pada noncontact sensing dari objek metal. Inductive proximity sensors beroperasi dengan menggunakan prinsip induktansi. Induktansi merupakan suatu keadaan dimana terjadi suatu fluktuasi arus listrik yang mengalir pada sebuah bahan magnetic menginduksi electromotive force (emf) dari sebuah object/target berupa metal.



Gambar 12. Inductive Proximity Sensor

Inductive Proximity sensor terdiri atas empat elemen dasar seperti terlihat pada gambar 2.27 keempat elemen pada Inductive Proximity sensor tersebut adalah:

1. Sensor coil dan Ferrite core
2. Oscillator circuit
3. Detection circuit
4. Solid state output circuit

Oscillator circuit menghasilkan radio frekuensi medan elektromagnetik yang berasal dari radiasi ferrite core dan coil assembly. Medan tersebut terdapat disekitar sumbu axis dari ferrite core. Ketika object yang berupa metal mendekati medan tersebut, eddy currents terinduksi pada permukaan target tersebut sehingga terjadi loading effect atau "damping", hal ini menyebabkan adanya reduksi amplitude dari sinyal oscillator. Detection circuit mendeteksi perubahan dalam oscillator amplitude, detection circuit yang berfungsi seperti sebuah switch akan short pada saat perubahan amplitude pada oscillator amplitude sampai pada nilai tertentu. Sinyal ON dari detection circuit tersebut akan menyalakan solid-state

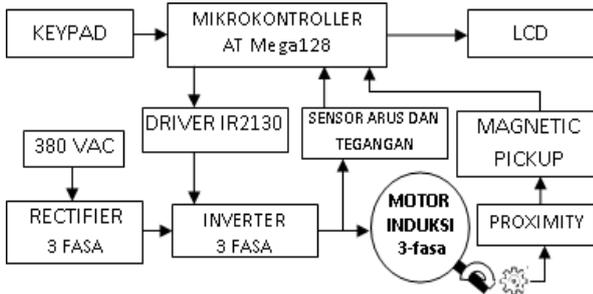
output menjadi ON. Begitu juga sebaliknya untuk menjadikan output switch menjadi OFF.

3. PERANCANGAN SISTEM

Pada sistem ini menggunakan setting input dari arus stator dan kecepatan motor dan estimasi sebagai feed back-nya adalah dari sensing arus dan tegangan keluaran inverter dan respon kecepatan motornya melalui pemodelan Vektor Kontrol.

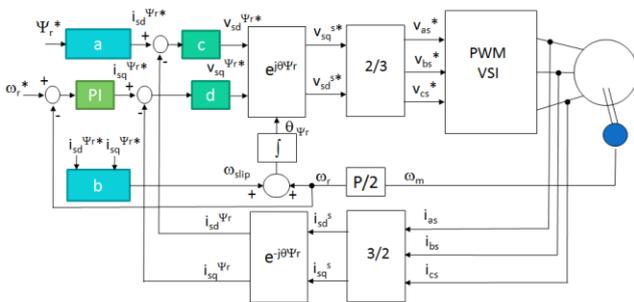
3.1 Perencanaan Sistem Hardware

Gambar 11 merupakan blok diagram hardware sistem secara keseluruhan dalam proyek akhir ini,



Gambar 13. Blok diagram hardware

Dibawah ini adalah blok diagram kontrol PI-Fuzzy secara terperinci



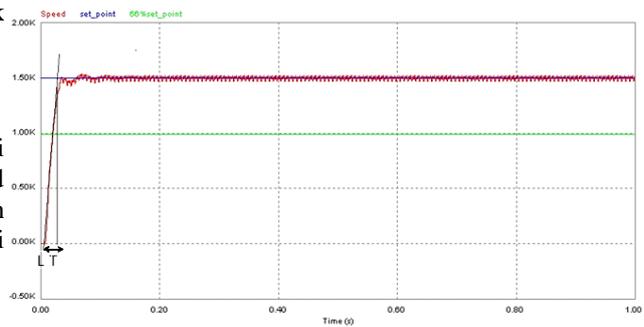
Gambar 14. Blok diagram secara terperinci

Dengan melihat blok diagram diatas tampak bahwa sensor tegangan dan sensor arus mensensing dari output Inverter 3-fasa serta sensing kecepatan pada motor Induksi 3-fasa. Kemudian dilakukan transformasi dari *abc* ke *dq* menggunakan persamaan-persamaan vektor kontrol. Setting input dari kecepatan yang dibandingkan pembacaan sensor kecepatan dan rus refrensi stator.

3.1 Perencanaan Sistem Kontrol PI-Fuzzy

Setelah perancangan dengan menentukan parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan maka didapatkan respon kecepatan yang akan dikontrol menggunakan PI-Fuzzy. Melalui respon kecepatan kita dapat menentukan parameter K_p dan K_i dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols.

Dari hasil grafik respon kecepatan motor induksi tiga fasa diperoleh grafik seperti pada gambar 13 dibawah ini,



Gambar 15. Respon kecepatan motor induksi tiga fasa

Dari respon dapat diperoleh nilai K_p dan K_i dengan perhitungan menggunakan metode Ziegler Nicolz sebagai berikut :

$$L = 0.008 \text{ s}$$

$$T+L = 0.02 \text{ s}$$

$$T = 0.02 - 0.008 = 0.012 \text{ s}$$

a. Menentukan parameter K_p

$$K_p = 0.9 \left(\frac{T}{L} \right) \quad (11)$$

$$K_p = 0.9 \left(\frac{0.012}{0.008} \right)$$

$$K_p = 1.35$$

b. Menentukan parameter K_i

$$K_i = \frac{L}{0.83} \quad (12)$$

$$K_i = \frac{0.008}{0.83}$$

$$K_i = 0.009$$

4. HASIL PENGUJIAN SISTEM

Dari hasil perancangan, dilakukan pengujian baik perangkat keras maupun lunak. Dan diadakan pengukuran/pengujian masing-masing bagian (sub-sistem) dari perangkat-perangkat tersebut sebelum dilakukan integrasi. Untuk mengetahui semua sistem yang telah dirancang sesuai dengan hasil yang diharapkan.

4.1 Pengujian Parameter motor induksi 3-fasa

1. Test tanpa beban

Pada test tanpa beban untuk menentukan parameter X_m , dengan pengukuran tegangan, arus serta $\cos \theta$.

Tabel 2 Pengujian tanpa beban

V (Volt)	I (Ampere)	Cos θ
380	0.72	0.48 (lag)
220	0.31	0.92 (lag)

$$X_m = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_m} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 0.72} = 304.71 \Omega$$

2. Test beban DC

Pada test beban DC untuk menentukan parameter R_s dan R'_R dengan pengukuran pada tegangan dan arus.

Tabel 3 Pengujian DC

V (Volt)	I (Ampere)
5	0.124
10	0.25
15	0.375
20	0.501
25	0.625
30	0.748
33	0.819
77	1.93

$$R_{dc} = R_s = \frac{V_{dc}}{2 \times I_{dc}} = \frac{30}{2 \times 0.784} = 20 \Omega$$

$$R_{ac} = 1.3 \times R_{dc} = 1.3 \times 20 = 26 \Omega$$

3. Test hubung singkat

Pada test hubung singkat untuk menentukan parameter R_e dan X_e , dengan pengukuran tegangan, arus serta $\cos \theta$.

Tabel 4 Pengujian hubung singkat

V (Volt)	I (Ampere)	Cos θ
440	1.12	0.32

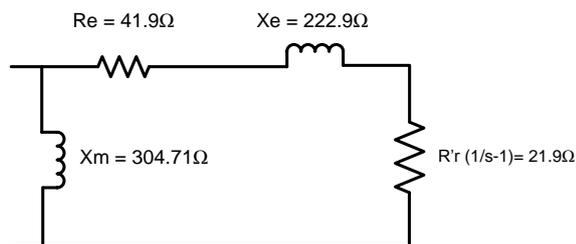
$$P = 440 \times 1.12 \times 0.32 = 157.7 \text{ Watt}$$

$$R_e = \frac{P_{BR}}{3 \times I_{BR}^2} = \frac{157.7}{3 \times 1.12^2} = 41.95 \Omega$$

$$Z_e = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3} \times I_{BR}} = \frac{440}{\sqrt{3} \times 1.12} = 222.9 \Omega$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{222.9^2 - 41.95^2} = 222.9 \Omega$$

$$R'_R = R_e - R_s = 41.95 - 20 = 21.9 \Omega$$



Gambar 16. Rangkaian ekuivalen motor induksi 3-fasa

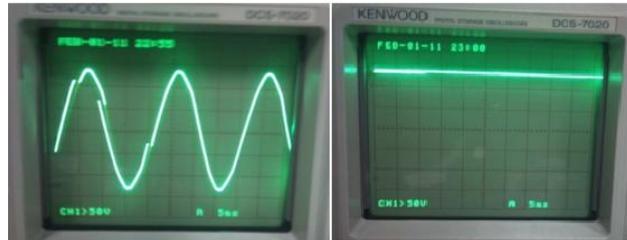
4.2 Pengujian Penyearah Gelombang Penuh Tiga Fasa

Pengujian pada rangkaian rectifier tiga fasa, pengujian diambil beberapa parameter seperti tegangan input (V_{in}), tegangan output (V_{out}), arus input (I_{in}) dan arus output (I_{out}).

Dari pengujian tersebut diambil beberapa data dengan menggunakan beban resistor load 1.153K Ω adalah sebagai berikut :

Tabel 5 Hasil Pengujian Rectifier 3-fasa

V_{in} (Volt AC)	I_{in} (Ampere)	V_{out} (Volt DC)	I_{out} (Ampere)
380	5.78	536	38.65
340	5.33	482	38.70
300	4.97	423	35.87
260	4.20	367.2	32.98
220	3.90	312.4	30.6



Gambar 17. Respon tegangan input dan output rectifier tiga fasa

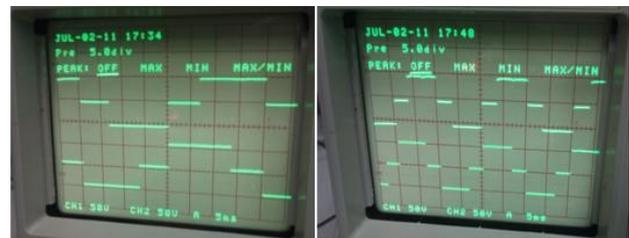
4.2 Pengujian Inverter Tiga Fasa

4.2.1 Pengujian Tanpa Beban

Data hasil pengujian rangkaian inverter tanpa beban ditunjukkan di dalam tabel 7 Pengujian dilakukan dengan merubah frekwensi inverter dan melakukan pengukuran tegangan keluaran pada inverter tiga fasa. Pada pengujian rangkaian inverter ini dilakukan dengan memberikan frekwensi 10 sampai 50 Hz.

Tabel 6 Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa tanpa beban

Vdc (V)	VoutL-L (Volt)				
	Frekuensi (Hz)				
	10	20	30	40	50
50	39,48	38,76	38,56	38,15	37,94
100	77,9	76,2	75	74	73,9
150	111,8	112,2	112,1	111,7	111,6
200	147,6	147,2	146,9	147,5	147,3
250	188,8	188,4	188,3	187,9	187,7



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Gambar 18. Respon tegangan output fasa R-S pada frekwensi (a) 10Hz, (b) 20 Hz, (c) 30 Hz, (d) 40 Hz dan (e) 50 Hz

Dari respon tegangan AC di atas dapat kita lihat bahwa, besarnya tegangan keluaran output rangkaian inverter tiga fasa antar fasanya bergantung dari besarnya tegangan masukan VDC dan ketika frekwensi diubah ternyata besarnya tegangan keluaran rangkaian inverter tiga fasa antar fasanya tidak bergantung terhadap besarnya frekwensi yang dimasukkan. Hal ini dikarenakan metode penyulutan yang digunakan adalah PWM.

4.2.2 Pengujian Dengan Beban

Data hasil pengujian rangkaian inverter tanpa dengan beban ditunjukkan di dalam tabel 8 Pengujian dilakukan dengan merubah frekwensi inverter dan melakukan pengukuran tegangan keluaran pada inverter tiga fasa. Pada pengujian rangkaian inverter ini dilakukan dengan memberikan frekwensi 10 sampai 50 Hz dengan tegangan masukan konstan.

Tabel 7 Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa dengan beban

F (Hz)	Vin Rectifier (Vac)	Vout Rectifier (Vdc)	Vin Inverter (Vdc)	Iout Inverter (A)	Vout L-L (V)			RPM
					V _{R-S}	V _{R-T}	V _{S-T}	
10	73.4	100	100	1.3	75.8	71.2	76.9	296
20	73.4	100	100	1.1	73.4	71.3	74.9	593
30	73.4	100	100	1.0	72.3	69.8	74.5	898
40	73.4	100	100	0.9	71.4	69.5	73.8	1186
50	73.4	100	100	0.8	70.8	69.3	73.3	1483

4.2.3 Pengujian Pembebanan Berbeban

Pada pengujian ini memberi beban pada motor untuk melihat respon kontrol kecepatan dari motor induksi tiga fasa. Data pengujian dari pembebanan motor induksi tiga fasa bisa dilihat pada tabel 9.

Tabel 8 Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa pembebanan motor

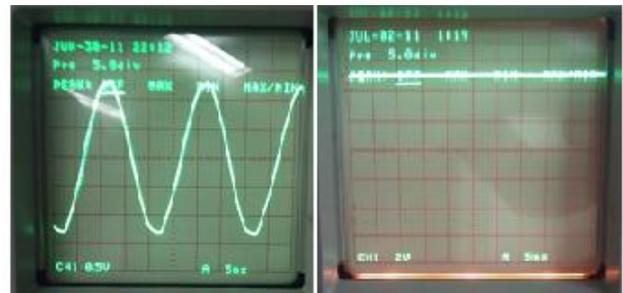
F (Hz)	Vin Rectifier (Vac)	Vin Inverter (Vdc)	Vout l-l Inverter (Vac)	RP M	Torsi	Iout (A)
50	73.4	100	75.8	1495	0	1
50	73.4	97.8	72.5	1452	0.2	1.5
50	73.4	95.9	71.3	1325	0.45	1.7

4.3 Pengujian Sensor Arus

Pada pengujian sensor arus ACS diambil data output dari sensor arus ini berupa tegangan yang proporsional dengan nilai arus input yang dibaca, dengan sensitivitas 185 mV/A. Kemudian diambil data setelah dikuatkan dari sensor arusnya. Sehingga setiap kenaikan tegangan 185 mV linier dengan arusnya.

Tabel 9 Data hasil pengujian Sensor Arus

I Beban Ampere	Vout ACS (Volt AC)	Vout Penguatan (Volt DC)
1	184	1.02
2	369	1.98
3	553	2.89
4	732	3.85
5	920	4.98



(a)

(b)

Gambar 19. Respon (a) arus input dan (b) tegangan output dari sensor arus

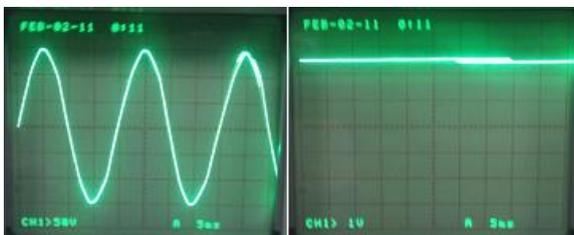
4.4 Pengujian Sensor Tegangan

Pada pengujian sensor tegangan ini adalah mensensing tegangan output dari inverter tiga fasa yang nantinya merupakan input yang akan dibaca kedalam mikrokontroler ATmega128 melalui ADC. Dengan ini hasil dari pengujian sensor tegangan AC dengan masukan sebesar tegangan 380 VAC dan hasil tegangan output yang diharapkan adalah 5 VDC yang sudah disearahkan, sehingga bisa langsung dimasukkan kedalam mikrokontroler. Dibawah ini adalah gambar hasil pengujian beserta data pengujiannya.

Tabel 10 Data hasil pengujian Sensor Tegangan

Vin (Volt AC)	Vout (Volt DC)
380	5.25
340	4.64
300	4.04
260	3.39
220	2.67

Dari hasil pengujian sensor tegangan pada tabel 5 maka untuk tegangan masukan 380 VAC hasil keluaran pada sensor tegangan adalah 5.25 Vdc dimana pada pembacaan maksimal ADC adalah 5 VDC sesuai dengan nilai A_{VCC} atau A_{REF} pada ADC yang digunakan pada mikrokontroler. Begitupun selanjutnya semakin turun tegangan masukan dari sensor tegangan maka semakin kecil nilai keluaran yang dihasilkan. Oleh karena ini maka sensor tegangan yang digunakan sudah linier untuk dimasukkan kedalam pembacaan ADC pada mikrokontroler.



(a) (b)

Gambar 20. Respon (a) tegangan input dan (b) tegangan output dari sensor tegangan

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan dan perencanaan sistem dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Pada pengujian output inverter secara open loop, input untuk inverter tidak bisa mencapai maksimum, karena keterbatasan kemampuan dari mosfet yang digunakan, meskipun pada datasheet kemampuan mosfet tipe IRFP 460 sampai 500 V, tetapi dilapangan hasilnya berbeda.
- Dari pengujian sensor arus persentase error 0.61%, sensor tegangan AC persentase error 12%, karena keterbatasan kemampuan komponen, sehingga antara pengujian dan perhitungan secara teori terdapat perbedaan.
- Penggunaan driver inverter IR2130 untuk menentukan Itrip nya harus sesuai dengan nilai data yang ada pada datasheetnya agar bisa bekerja sesuai dengan ratingnya. Dimana untuk mencapai ratingnya maka harus menggunakan nilai resistansi sebesar 66.66KΩ untuk mendapatkan Itrip maksimal 75uA. Karena keterbatasan komponen maka digunakan resistansi sebesar 50KΩ.
- Dalam metode Vektor kontrol ini menggunakan kontrol PI-Fuzzy yang didapatkan dari referensi masukan kecepatan motor induksi 3-fasa dengan respon kecepatan motornya yang nantinya sebagai kontrol Fuzzynya untuk mengatur nilai

Kp pada kontrol PI-nya sehingga keluaran dari kontrol PI-Fuzzy tersebut mendapatkan referensi sumbu q-nya yang nantinya disebut Iqs. Dan dari Iqs ini nantinya dibandingkan dengan Iqs estimasi perubahan dari Arus keluaran Inverter. Kemudian referensi yang kedua adalah arus stator motornya yang disebut Ids referensi yang dibandingkan dengan Ids estimasinya.

5.1 Saran

- Dari beberapa alat yang telah dilakukan pengujian yang telah dilakukan untuk mendapatkan overshoot yang rendah serta settling time yang pendek perlu disempurnakan lagi, karena masih banyak terdapat kekurangan.
- Pada proses kontrol diperlukan suatu sensor dengan performa yang baik, sehingga dapat memberikan respon yang baik pula untuk pengembangan lebih lanjut penulis berharap digunakan sensor dengan performa yang baik dan stabil.
- Agar perhitungan matematik dalam metode Vektor Kontrol dapat tercapai dengan baik. Maka digunakan Mikrokontroler yang memiliki tingkat eksekusi perhitungan yang tinggi yaitu Mikrokontroler yang memiliki kemampuan 32 Bit.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wahyudi Candra Agus Dwi, "Pengaturan kecepatan motor induksi Tiga fasa Dengan menggunakan control jst Untuk beban yang fluktuasi", Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 2007.
- [2] Saputra Ardyan, "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Sebagai Penggerak Motor Induksi Satu Fasa", Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 2009.
- [3] Hermanto Bambang, "Rancang Bangun Chooper Inverter", Proyek Akhir, 2007.
- [4] Yuliani Lidia Dwi, "Rancang Bangun AC-DC Battery Charger Pada Penyediaan Daya Cadangan Rumah Tangga", Proyek Akhir, 2007.
- [5] Datasheet ACS712, "Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kV RMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor", Allegro MicroSystems, 2006.
- [6] MEP 1422, "Dynamic Model of Induction Machine", hal. 29
- [7] Ardana I Wayan Raka, "Simulasi Sistem Kontroler PID untuk Motor Induksi menggunakan perangkat lunak Matlab / Simulink", Politeknik Negeri Bali, Bali, 2008.
- [8] Nik Idris Nik Rumzi, "Field-Oriented Control of Induction Machine", Department of Energy Conversion, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia
- [9] Domenico Casadei, Member, IEEE, Francesco Profumo, Senior Member, IEEE, Giovanni Serra, Member, IEEE, and Angelo Tani, "FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 17, No. 5, September 2002.