

# KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGUNAKAN SCALAR CONTROL DENGAN PI GAIN SCHEDULING PADA KONDISI DINAMIK

A. A. Muntashir<sup>1)</sup>, K. R. S. Suda<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> Mekatronika, Politeknik Astra

<sup>2</sup> Teknik Elektronika, Politeknik Nasional

Email: abdillah.muntashir@polytechnic.astra.ac.id, redasetiawan1@gmail.com

## ABSTRAK

Kebutuhan energi bahan bakar terus meningkat, sehingga mendorong penelitian dalam pengembangan energi terbarukan. Pengembangan teknologi kendaraan listrik menjadi salah satu solusi upaya pengurangan penggunaan minyak bumi. Dalam penerapannya, kendaraan listrik digerakkan oleh motor, salah satunya menggunakan motor induksi 3 fasa. Motor induksi 3 fasa disamping memiliki kelebihan juga memiliki kelemahan diantaranya tidak kokoh/stabil kecepatannya pada kondisi dinamik, serta memiliki time respon yang lambat. Untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa digunakanlah inverter 3 fasa dengan V/F Scalar Control. Penggunaan scalar control dengan menjaga konstan antara besaran tegangan dan frekuensi motor sehingga mampu menjaga besarnya fluks tetap konstan. PI Gain scheduling memberikan aksi control time respon yang cepat pada kondisi dinamik, sehingga dapat mengoptimalkan kinerja dari kendali motor induksi 3 fasa. Analisa performa motor dilakukan pada simulasi matlab. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan PI Gain Scheduling dengan kondisi dinamik kecepatan yaitu set point 900 RPM hingga 1435 RPM dengan dengan torsi beban sebesar 7 Nm, dapat mempercepat time respon kecepatan motor induksi 3 fasa dalam menuju ke kondisi tunak, hal ini lebih baik dibanding dengan kondisi loop terbuka. Dengan time respon yaitu rise time dari 0.31 s menjadi 0.065 s dan nilai settling time dari 0.46 s menjadi 0.125 s dengan error steady state mendekati 0% ketika pengujian set point 1200 RPM.

**Kata kunci:** Kendaraan Listrik, Motor Induksi 3 Fasa, PI Gain Scheduling, Scalar Control

## ABSTRACT

*Fuel energy needs continue to increase, thus encouraging research in development of renewable energy. The development of electric vehicle technology is one of the solutions to reduce the use of petroleum. In its application, electric vehicles are drive by motors, one of which uses a 3-phase induction motor. Besides having advantages, 3-phase induction motors also have weaknesses, including not being robust/stable in speed under dynamic conditions, and having a slow response time. To regulated the speed of a 3-phase induction motor, a 3-phase inverter with V/F Scalar Control is use. The use of scalar control by maintaining a constant between the magnitude of the voltage and the frequency of the motor to maintain a constant amount of flux. PI Gain scheduling provides fast response time control action under dynamic conditions, to optimize the performance of 3-phase induction motor control. Motor performance analysis is carried out in Matlab simulations. The simulation results show that using PI Gain Scheduling with speed dynamic conditions, namely a set point of 900 RPM to 1435 RPM with a load torque of 7 Nm, can accelerate the speed response time of a 3-phase induction motor to steady stated, better than open loop condition. The response time is the rise time from 0.31 s to 0.065 s and the settling time from 0.46 s to 0.125 s with a steady state error close to 0% when testing the set point at 1200 RPM.*

**Keywords :** 3 Phase Induction Motor, Electric Vehicle, PI Gain Scheduling, Scalar Control,

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi bahan bakar setiap tahunnya terus meningkat, sedangkan cadangan minyak di Indonesia semakin menipis. Melihat kondisi cadangan minyak bumi yang semakin berkurang penelitian terkait energi alternatif yang mudah dan ramah lingkungan semakin masif dilakukan termasuk pengembangan teknologi di bidang mobil listrik [8]. Mobil listrik memiliki kelebihan yang potensial dibanding mobil bermesin pembakaran, terutama tidak dihasilkannya emisi bahan bakar fosil. Umumnya mobil listrik digerakkan dengan menggunakan motor induksi 3 fasa dimana pada motor induksi 3 fasa terdapat beberapa metode pengaturan kecepatannya [15].

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik yang banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga [9]. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan di bidang industri karena harganya relatif murah untuk bidang industri dan mempunyai kehandalan yang tinggi. Selain itu, efisiensi motor induksi 3 fasa relatif tinggi pada keadaan normal dan tidak memerlukan biaya perawatan yang besar [3]. Namun motor induksi 3 fasa memiliki beberapa kelemahan yaitu tidak dapat mempertahankan kecepatannya secara konstan bila terjadi perubahan beban, mempunyai respon kecepatan yang lama dalam menuju ke keadaan steady state serta arus starting motor induksi 3 fasa biasanya 5 - 7 dari arus nominalnya [12]. Oleh karena itu untuk mendapatkan kecepatan yang konstan dan performansi sistem yang lebih baik terhadap perubahan beban dibutuhkan suatu pengontrol. Pada beberapa pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa memiliki beberapa kelemahan, seperti halnya pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan mengatur frekuensinya saja, kecepatan motor induksi 3 fasa dapat diatur kecepatannya sesuai dengan frekuensinya tetapi semakin besar nilai frekuensinya torsi yang didapatkan pada motor tersebut akan turun. Pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan mengatur tegangan sumber, kecepatan motor induksi 3 fasa dapat diatur apabila dalam keadaan berbeban, torsi yang dihasilkan motor semakin besar dengan semakin besarnya tegangan sumber [19]. Tetapi dengan mengatur tegangan sumber yang terlalu besar dapat mengakibatkan terjadinya fenomena saturasi pada fluks [1].

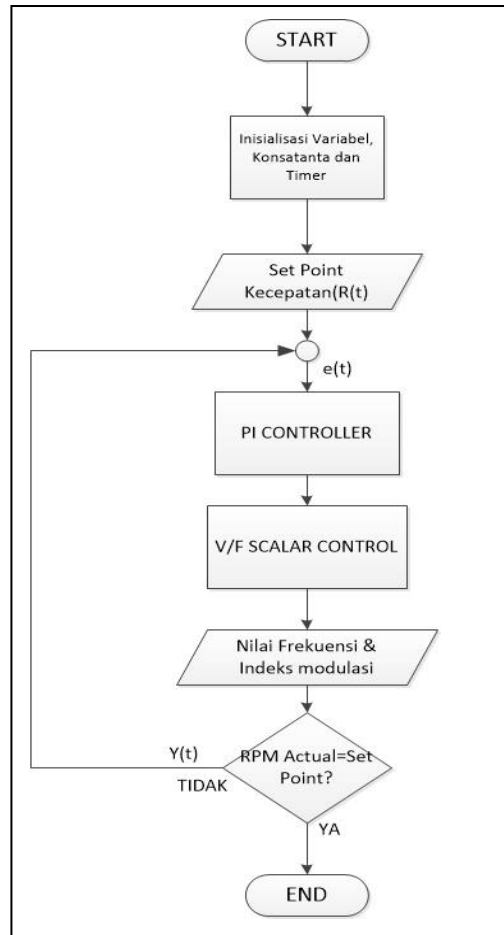
Pengontrol kecepatan motor induksi 3 fasa dilakukan dengan *scalar control* atau biasa disebut juga kontrol tegangan/frekuensi (V/F). Prinsip dari kontrol skalar ini adalah memaksa motor memiliki hubungan yang konstan antara tegangan dan frekuensi mampu menjaga besarnya fluks dan nilai torsi maksimum tetap konstan [8], sehingga diharapkan konsumsi arus tidak terlalu besar pada frekuensi rendah. *Scalar control* relatif mudah dalam pengontrolannya tetapi memiliki kelemahan yaitu adanya *coupling effect* yang menyebabkan ketika satu variable diatur maka akan berpengaruh pada variabel lainnya [10][2].

Dengan menggunakan metode *scalar control* dapat mengatasi kelemahan pada pengaturan kecepatan motor induksi yaitu arus *starting* pada motor tidak terlalu besar pada frekuensi rendah selain itu, dengan menjaga konstan nilai ratio tegangan dengan frekuensi pengaturan putaran dapat dijaga tetap, torsi yang didapatkan motor juga akan konstan sehingga fluks juga akan konstan, sehingga dapat mencegah terjadinya saturasi fluks [20], sehingga pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa lebih efektif dan menghasilkan respon yang baik. *PI Gain Scheduling* berfungsi sebagai *control* untuk perbaikan respon terhadap perubahan kecepatan dinamik yang ditentukan [16]. Dengan adanya *PI Gain Scheduling* dapat menghasilkan output dengan *risetime* yang cepat dan *error steady state* yang kecil sesuai keunggulan dari aksi *control proporsional* dan *integral*. Motor induksi 3 Fasa yang digunakan memiliki daya 1.5 HP atau setara dengan 1.2 KW dengan frekuensi 50 Hz.

## 2. METODE PENELITIAN

Pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dilakukan secara *loop* tertutup dengan nilai *set point* kecepatan yang menjadi nilai referensi kecepatan putaran pada motor. Besarnya nilai sinyal error  $e(t)$  yang didapatkan dari sinyal feedback kecepatan  $Y(t)$  yang dibandingkan dengan nilai set point  $R(t)$  sehingga didapatkan sinyal error  $e(t)$ , nantinya sinyal tersebut

yang digunakan sebagai input controller yaitu PI Gain Scheduling untuk diolah sehingga didapatkan sinyal control  $u(t)$ . Sehingga keluaran dari scalar control berupa sinyal control modulation amplitude ( $ma$ ) dan modulation frekuensi ( $mf$ ) digunakan sebagai input dari pembangkitan sinyal sinusoidal pulse width modulation (SPWM). Perubahan nilai parameter PI, Nilai  $K_p$  Dan  $K_i$  berpengaruh Pengaruh terhadap nilai Rise Time, Overshoot, Settling Time, dan Steady State Error [17]. Pada gambar 1 merupakan diagram alir dari *control system*.



Gambar 1. Flowchart control system

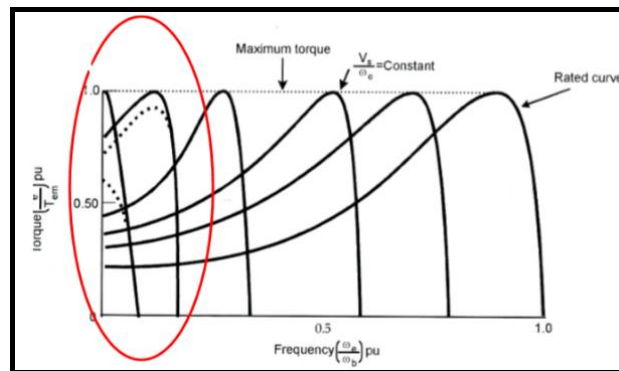
## 2.1 Kendali V/F Scalar Control

Kecepatan motor induksi berbanding lurus dengan frekuensi sumber daya dan jumlah kutub dari motor. Karena jumlah kutub ditetapkan melalui desain, cara terbaik untuk merubah kecepatan dari motor induksi tersebut adalah dengan merubah frekuensi sumber daya. Torsi yang dihasilkan oleh motor induksi adalah berbanding lurus dengan rasio tegangan yang diberikan dan frekuensi sumber daya [8]. Dengan merubah tegangan dan frekuensi, tetapi menjaga konstan rasio keduanya, torsi yang dihasilkan dapat dijaga konstan sepanjang daerah pengaturan kecepatan.

Kontrol kecepatan motor induksi dilakukan oleh mempertahankan rasio  $v/f$  yang konstan untuk menghindari celah udara variasi fluks [9][12]. Tujuan dari kontrol  $v/f$  *constan* adalah untuk menjaga torsi konstan dan independen frekuensi, mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan arus yang lebih rendah saat *run-time*. Ketika frekuensi stator dinaikkan diatas nilai frekuensi dasarnya maka tegangan stator dibuat konstan pada kondisi nominalnya. Semakin besarnya frekuensi stator diatas frekuensi dasar, semakin besarnya pula kecepatan stator ( $\omega_s$ ) [13]. Ketika tegangan stator konstan dengan kondisi frekuensi diatas pengenalnya maka fluks pada mesin berkurang dan maksimum torsi berkurang bersamanya. Pengaturan ini berada pada daerah daya ( $P_m$ ) konstan. Pada pengoperasi kecepatan tinggi, *drop* tegangan yang melewati resistansi dan induktansi stator dapat

diabaikan karena nilainya kecil sehingga tegangan stator ( $V_s$ ) mendekati sama dengan tegangan induksi motor ( $E_1$ ).

Pada pengoperasian kecepatan rendah, frekuensi stator diturunkan dibawah tegangan nominal ( $V_s$ ) maka mengakibatkan peningkatan fluks pada celah udara ( $f \downarrow, \Phi_{AG} \uparrow$ ) [1]. Solusi untuk menjaga fluks tetap dalam kondisi konstan ketika frekuensi diturunkan dibawah tegangan nominal maka tegangan yang diterapkan pada motor juga harus dikurangi secara linier dengan penurunan frekuensi (Metode  $V/f$ ) sehingga torsi maksimum tetap mendekati konstan. Untuk pengoperasian kecepatan rendah, *drop* tegangan yang melewati resistansi dan induktansi stator tidak boleh diabaikan karena nilainya besar sehingga tegangan stator ( $V_s$ ) tidak sama dengan tegangan induksi motor ( $E_1$ ) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1. Rendahnya pengoperasian kecepatan mengakibatkan *drop* tegangan yang cukup besar sehingga kemampuan torsi buruk (torsi turun) seperti yang ditunjukkan Gambar 2. Salah satu cara untuk mengatasi hal ini dengan diberi rangkaian eksternal berupa penaik tegangan. Tujuan rangkaian ini untuk mengkompensasi *drop* tegangan dan menjaga fluks tetap konstan sehingga torsi puncak tidak turun.



Gambar 2. Kurva torsi-kecepatan dengan variasi frekuensi dan tegangan secara linier [14].

Untuk operasi pada frekuensi  $k$  kali dari frekuensi nominal ( $f_{\text{nominal}} = k f_s$ ) maka frekuensi dan tegangan yang diterapkan pada motor dapat ditunjukkan pada Persamaan 1 dan 2 [14].

$$f_s = K \times f_{s, \text{nominal}} \Rightarrow \omega_s = k \times \omega_{s, \text{nominal}} \quad (1)$$

$$V_s = \begin{cases} K \times V_{\text{nominal}} & \text{ketika } f_s < f_{\text{nominal}} \\ V_{\text{nominal}} & \text{ketika } f_s > f_{\text{nominal}} \end{cases} \quad (2)$$

Dimana  $K$  adalah konstanta pengali. Dari Persamaan 1 dan 2 maka didapat kesimpulan bahwa tegangan dan frekuensi adalah sebanding dengan *derating* yang sama. Rasio tegangan dengan frekuensi ditunjukkan pada Persamaan 3 [10].

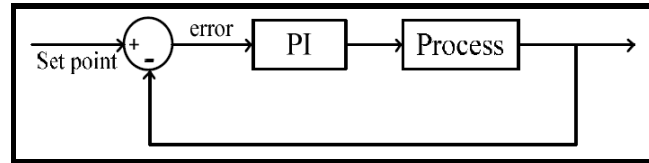
$$\text{derating} = \frac{V_{\text{nominal}}}{\omega_{\text{nominal}}} \quad (3)$$

$V/F$  *constan* dapat dicapai dengan mengatur frekuensi dari inverter dan juga mengatur tegangan outputnya. Pada metode *switching* SPWM, terdapat fasilitas yang berupa *modulation amplitude*. *Modulation amplitude* merupakan perbandingan antara *amplitude* sinus dengan *amplitude* segitiga pada *switching* SPWM, sedangkan *modulation frequency* merupakan perbandingan antara frekuensi sinyal segitiga dengan frekuensi sinyal sinus pada *switching* SPWM. Nilai ratio  $v_{\text{out}}/f$  yaitu 4.4 didapat sesuai dengan *nameplate* pada motor induksi 3 fasa yang digunakan yaitu 220V/50Hz sehingga didapat ratio  $v_{\text{out}}/f = 4.4$ .

## 2.2 PI Tuning

Di dalam suatu sistem kontrol kita mengenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol *proporsional* dan aksi kontrol *integral* [18]. Masing-masing aksi kontrol ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol *proporsional* mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kontrol *integral* mempunyai keunggulan

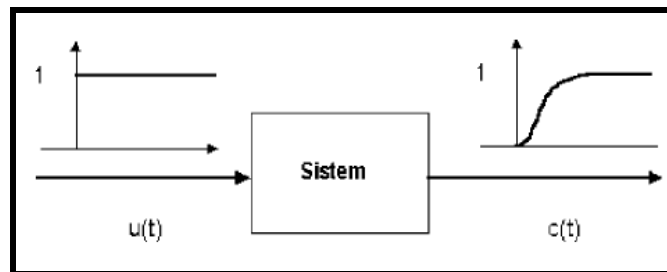
untuk memperkecil *error* [4][7]. Untuk itu agar kita dapat menghasilkan output dengan *rise time* yang cepat dan *error* yang kecil kita dapat menggabungkan kedua aksi kontrol ini menjadi aksi kontrol PI. Kontroler PI biasanya digunakan untuk kontrol kecepatan aplikasi [5]. Blok diagram dari penerapan sistem loop tertutup pengontrol PI telah ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Blok diagram *close loop* PI controller [3]

### 2.2.1 Metode Ziegler Nichloz

Ziegler-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942 [2]. Metode ini memiliki dua cara, metode osilasi dan kurva reaksi. Kedua metode ditujukan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25%. Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem untai terbuka. *Plant* sebagai untai terbuka dikenai sinyal fungsi tangga satuan. Jika *plant* minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun *pole-pole* kompleks, reaksi sistem akan berbentuk S [6]. Gambar 4 menunjukkan kurva berbentuk S tersebut. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk *plant* integrator maupun *plant* yang memiliki *pole* kompleks.



Gambar 4. Respon tangga satuan sistem [6]

Kurva berbentuk S mempunyai dua konstanta, waktu mati (*dead time*)  $L$  dan waktu tunda  $T$  [11]. Terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu  $L$ . Sedangkan waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan stabilnya. Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis singgung itu akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum. Perpotongan garis singgung dengan sumbu absis merupakan ukuran waktu mati, dan perpotongan dengan garis maksimum merupakan waktu tunda yang diukur dari titik waktu  $L$ . Zeigler Nichols melakukan eksperimen dan menyarankan parameter pengaturan nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut. Tabel 1 merupakan rumusan penalaan parameter PID berdasarkan cara kurva reaksi.

Tabel 1. Parameter PID dengan metode kurva reaksi [11]

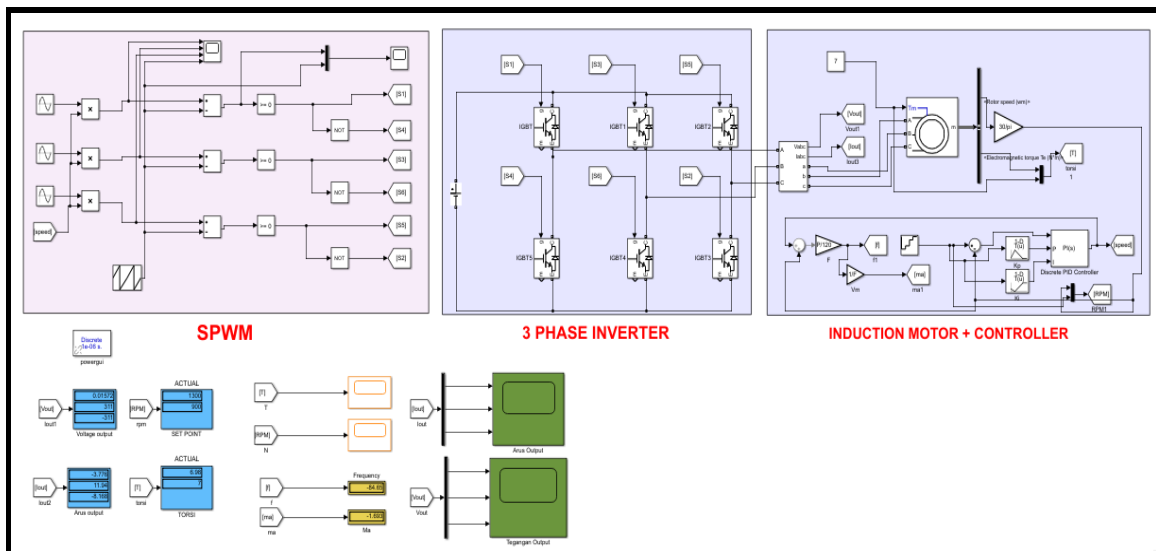
Time Pengontrol	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\sim$	0
I	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2L$	$0,5 L$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan sistem menggunakan Simulink MATLAB dengan spesifikasi motor induksi 3 fasa yang digunakan seperti pada Tabel 2. Gambar 5 merupakan diagram keseluruhan sistem kendali kecepatan motor induksi 3 fasa yang dimodelkan menggunakan Simulink Matlab.

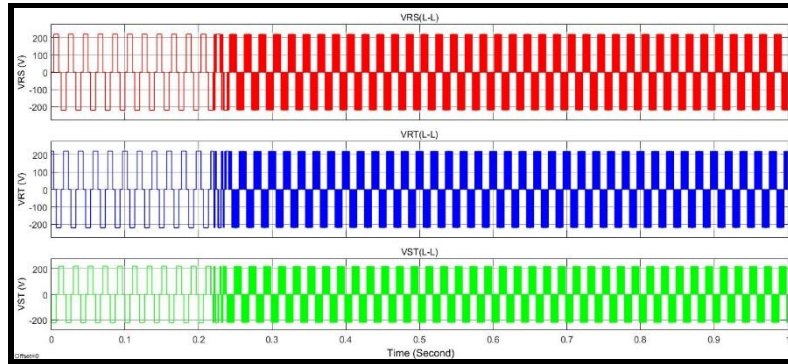
Tabel 2. Data Parameter motor induksi 3 fasa

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	$R_{stator}$	5,26	$\Omega$
2	$R_{rotor}$	6,47	$\Omega$
3	$L_{stator}$	0,0447	$H$
4	$L_{rotor}$	0,0269	$H$
5	$L_{magnetization}$	0,128	$H$
6	$P_n$	1,5	$HP$
7	$V_{l-l}$	230	$Volt$
8	<i>frekuensi</i>	50	$Hz$
9	<i>pole</i>	4	<i>unit</i>

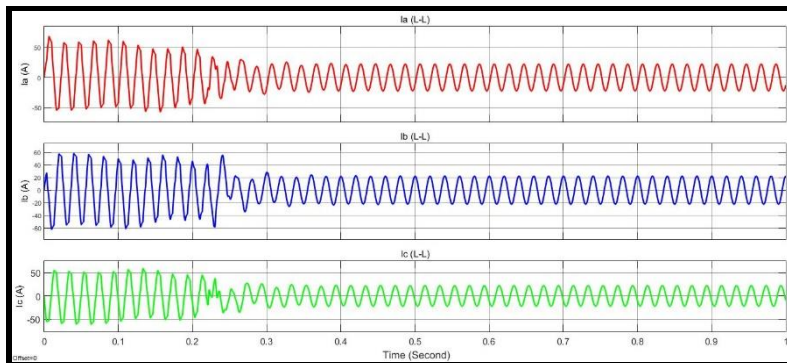


Gambar 5. Diagram keseluruhan sistem

Gambar 5 diatas merupakan blok diagram simulasi keseluruhan sistem. Simulasi ini terdapat 3 main diagram *block* yaitu *block sinusoidal pulse width modulation (SPWM)*, *block inverter 3 fasa* dan *block motor induksi 3 fasa dengan controller*. Parameter yang diamati pada *scope* meliputi tegangan, arus inverter 3 fasa serta kecepatan dan torsi motor. Pada Gambar 6 merupakan gambar gelombang tegangan output  $V_{L-L}$  dari inverter 3 fasa yang terhubung ke motor induksi 3 fasa dengan torsi beban sebesar 7 Nm. Didapatkan nilai tegangan output  $V_{L-L}$  sebesar 220 Vrms. Sedangkan pada Gambar 7 merupakan gelombang arus output  $I_{L-L}$  keluaran dari inverter 3 fasa yang terhubung ke motor induksi 3 fasa. Didapat nilai arus output  $I_{L-L}$  sebesar 10 A.

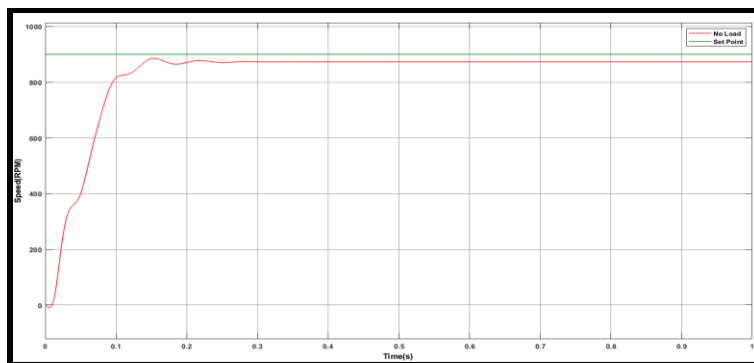


Gambar 6. Tegangan output  $V_{L-L}$

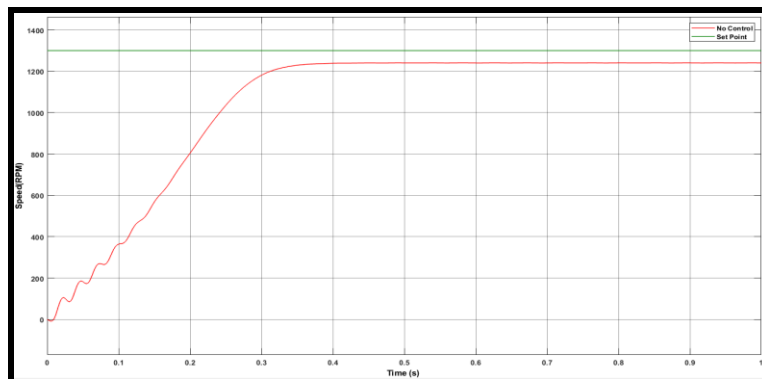


Gambar 7. Arus output  $I_{L-L}$

Respon kecepatan motor induksi 3 fasa yang didapatkan pada saat kondisi open loop dengan variasi nilai set point meliputi 900 RPM hingga 1435 RPM dengan torsi beban sebesar 7 Nm seperti pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Open loop set point 900 RPM



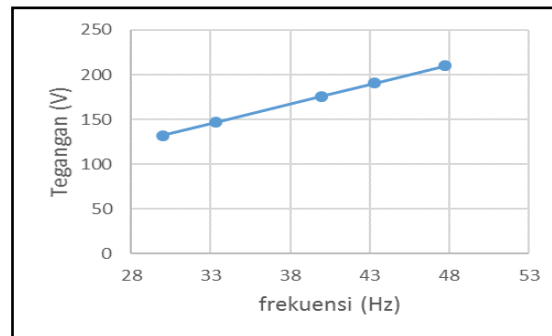
Gambar 9. Open loop set point 1300 RPM

Pada Gambar 8 saat set point 900 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,1 s, *settling time* 0,18 s. dan *error steady state* sebesar 0,111%. Pada Gambar 9 saat set point 1300 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,28 s, *settling time* 0,405 s. dan *error steady state* sebesar 0,769%. *Settling time* merupakan waktu yang ditempuh motor hingga menuju ke keadaan *steady state*. Sedangkan *rise time* merupakan waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 10% ke 90% dari nilai respon pada keadaan *steady state*. Dengan nilai *settling time* dan *rise time* yang didapatkan tersebut tergolong mempunyai respon yang jelek, sehingga diperlukan sebuah pengontrol untuk memperbaiki respon tersebut

Pada Tabel 3 merupakan data hasil simulasi *v/f scalar control* tegangan output ( $V_{L-L}$ ) dengan perubahan nilai set point kecepatan. Berdasarkan Tabel 3, dijelaskan bahwa semakin besar nilai frekuensi dan nilai kecepatan motor (RPM), maka semakin besar nilai modulasi amplitude (ma) sehingga nilai tegangan yang dihasilkan juga semakin besar. Dari tabel didapatkan besarnya ratio *v/f* yang dihasilkan konstan yaitu 4.4. Diperoleh grafik respon *v/f* constan seperti pada Gambar 10.

Tabel 3. Nilai Tegangan Output

RPM	Frekuensi (Hz)	Modulasi amplitude (ma)	Vrms(L-L) (V)	Ratio v/f
900	29,99	0,5998	131,95	4,39
1000	33,32	0,6665	146,63	4,4
1200	39,99	0,7999	175,97	4,4
1300	43,32	0.8665	190,63	4,4
1435	49,74	0,9549	210,07	4,4



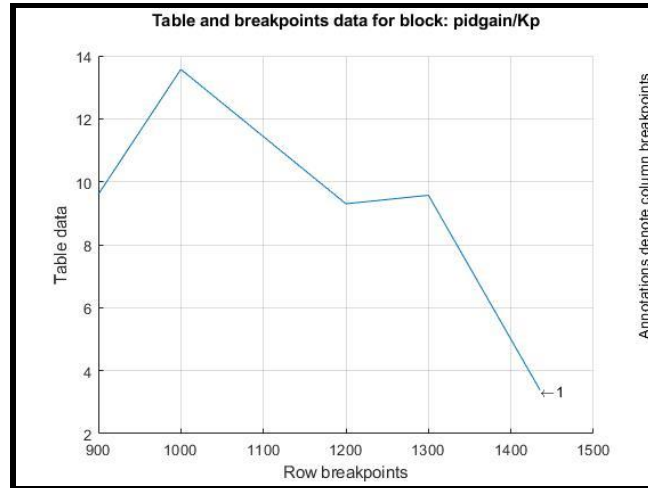
Gambar 10. Grafik *v/f* constan

Untuk memperbaiki respon dari kecepatan motor tersebut maka digunakanlah PI Gain Scheduling. Perhitungan dalam menentukan nilai variabel  $K_p$  dan  $K_i$  pada suatu pengontrol PI Gain scheduling, menggunakan teorema Ziegler nicholz 1. Pada Tabel 4 merupakan nilai parameter variabel  $K_p$  dan  $K_i$  berdasarkan perhitungan menggunakan teorema *Ziegler Nicholz*1. Nantinya nilai parameter tersebut digunakan sebagai variable dalam menyusul loop up table pada PI Gain scheduling. Look up table dari Pi Gain Scheduling ditunjukkan pada gambar 11 dan gambar 12.

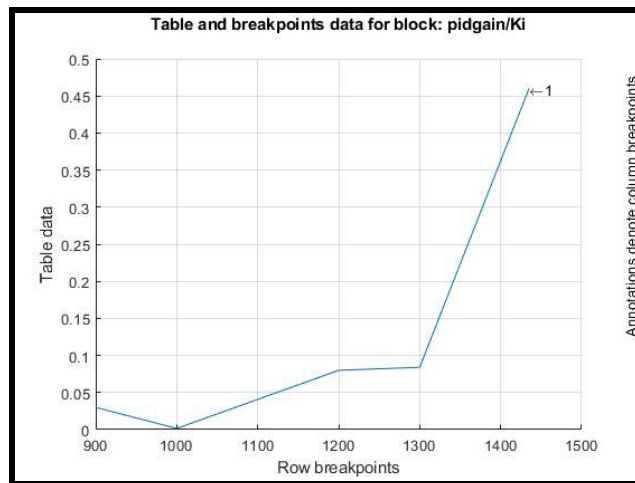
Tabel 4. Nilai parameter  $K_p$  dan  $K_i$

Set Point (RPM)	$K_p$	$K_i$
900	9,6	0,03 s
1000	13,569	0,0016 s
1200	9,3	0,08 s
1300	9,571	0,084 s
1435	3,391	0,46 s



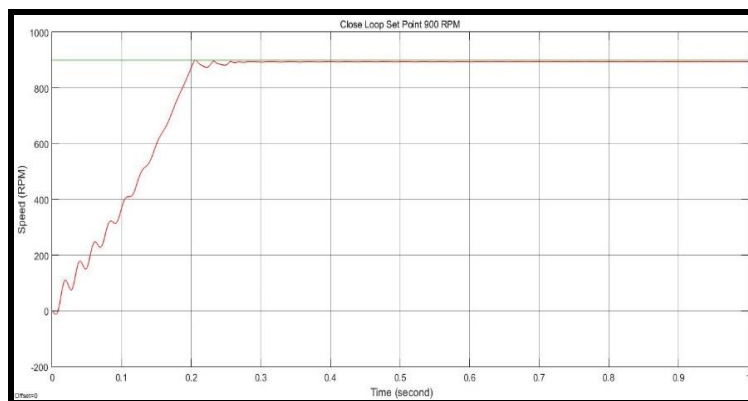


Gambar 11. Kp Gain Scheduling

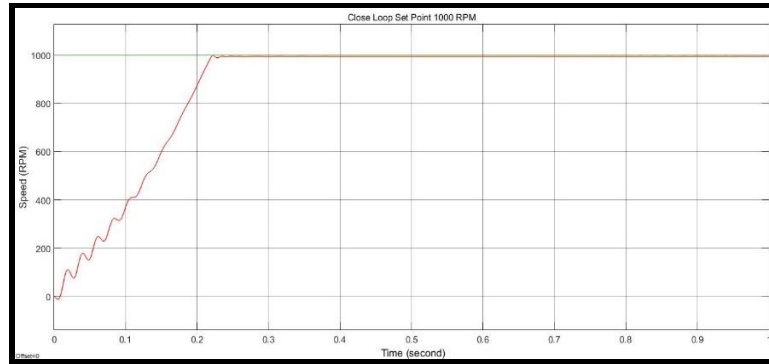


Gambar 12. Ki Gain Scheduling

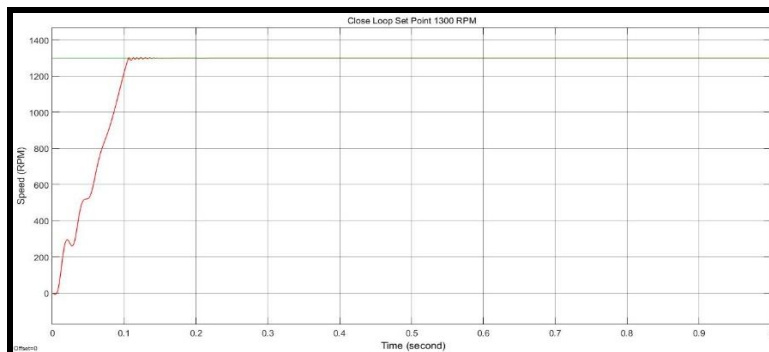
Berdasarkan parameter variabel Kp dan Ki yang sudah diperoleh, didapatkan respon kondisi *close loop* dengan variasi nilai set point 900 RPM hingga 1435 RPM dapat dilihat pada Gambar 13 - Gambar 15.



Gambar 13. Close loop set point 900 RPM



Gambar 14. Close loop set point 1000 RPM



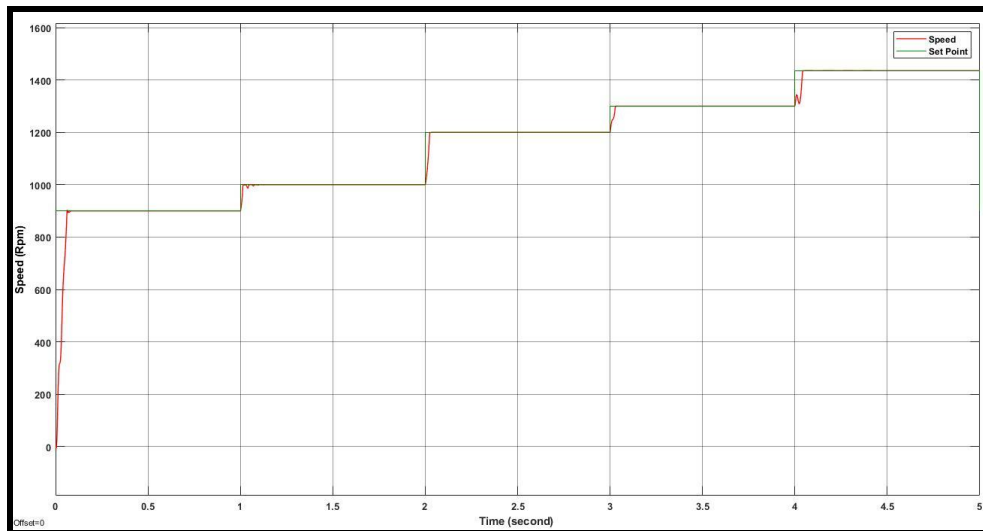
Gambar 15. Close loop set point 1300 RPM

Pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 15 merupakan respon kecepatan *close loop* motor induksi 3 fasa dengan nilai set point kecepatan 900 Rpm hingga 1300 Rpm. Pada Gambar 13 saat set point 900 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,165 s, *settling time* 0,205 s. dan *error steady state* sebesar 0,111%. Pada Gambar 14 saat set point 1000 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,13 s, *settling time* 0,22 s. dan *error steady state* sebesar 0,1%. Pada Gambar 15 saat set point 1300 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,07 s, *settling time* 0,11 s. dan *error steady state* sebesar 0,076%. Dari data respon open loop jika dibandingkan dengan data close loop, ketika kecepatan rendah yaitu saat set point 900 RPM respon open loop lebih baik dari respon close loop hal ini karena *v/f scalar control* tidak cocok pada pengaturan kecepatan rendah karena adanya daerah minimal frekuensi dan tegangan sehingga dibutuhkan suatu pengontrol untuk mengatur kecepatan rendah. Tetapi ketika set point 1300 RPM dan 1435 RPM, PI Gain Scheduling bekerja dengan baik sehingga respon close loop lebih baik dari respon open loop. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan nilai *rise time* dan *settling time* atau semakin cepatnya respon kecepatan motor dalam menuju keadaan *steady state*. Sehingga dapat ditabelkan untuk dibandingkan kondisi saat *open loop* atau belum digunakannya pengontrol dengan saat *close loop* atau saat digunakannya PI controller pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Respon *Open Loop* dan *Close Loop*

Kondisi	Set Point (RPM)	Rise time (s)	Settling time (s)	Error Steady state (%)
Open Loop	900	0,1	0,18	0,111
	1000	0,138	0,22	0,1
	1200	0,235	0,4	0,166
	1300	0,28	0,405	0,769
	1435	0,635	1,05	0,348
Close Loop	900	0,165	0,205	0,444
	1000	0,14	0,22	0,1
	1200	0,08	0,098	0
	1300	0,07	0,11	0,076
	1435	0,095	0,13	0,069

Salah satu kelemahan dari pengendali PI konvensional yaitu ketika dioperasikan pada kondisi dinamik, yaitu perubahan nilai set point dan perubahan nilai beban. Hal ini dikarenakan memang pengendali PI konvensional cocok dioperasikan pada kondisi/sistem linier. Ketika terjadi perubahan nilai set point atau nilai beban, maka nilai parameter variable  $K_p$  dan  $K_i$  juga harus berubah, karena memiliki respon yang berbeda. Salah satu metode yang bisa digunakan pada kondisi dinamik yaitu PI gain scheduling, dimana nilai parameter  $k_p$  dan  $k_i$  dari masing set point atau beban dibenamkan pada suatu look up tabel, sehingga nilai parameter  $K_p$  dan  $K_i$  tersebut akan menyesuaikan dengan nilai set point yang diinginkan. Seperti ditunjukkan pada gambar 16 merupakan respon close loop dengan kondisi dinamik perubahan nilai set point dengan PI gain scheduling.



Gambar 16. Kondisi dinamik dengan variasi nilai set point

#### 4. SIMPULAN DAN SARAN

Sistem kendali kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan V/F Scalar Control dengan PI Gain Scheduling pada kondisi dinamik, mampu memperbaiki respon kecepatan dari motor induksi 3 fasa dengan torsi beban 7 Nm dalam menuju keadaan *steady state*, dengan nilai *rise time* ( $t_r$ ) dari 0,31 s menjadi 0,065 s dan nilai *settling time* ( $t_s$ ) dari 0,46 s menjadi 0,125 s dengan *error steady state* sebesar 0% saat set point 1200 RPM. Pada kecepatan rendah set point 900 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,165 s, *settling time* 0,205 s. dan *error steady state* sebesar 0,111%. Pada kondisi dinamik dengan variasi perubahan nilai set point kecepatan, PI Gain Scheduling memberikan respon kecepatan sesuai *setpoint*, dengan respon yang cepat dalam menuju ke keadaan *steady state* kembali. PI Gain Scheduling bekerja dengan baik sehingga respon close loop lebih baik dari respon open loop. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan nilai *rise time* dan *settling time*. Untuk pengembangan selanjutnya pada *inverter 3 fasa* ditambahkan filter pada output, sehingga memiliki efisiensi yang lebih baik lagi serta memiliki kandungan harmonisa yang kecil.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Prasetia, A. M., & Santoso, H. (2018). Implementation of Scalar Control Method for 3 Phase Induction Motor Speed Control. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 3(1), 63-69.
- [2]. Allu, N., & Toding, A. (2020, May). Tuning with Ziegler Nichols method for design PID controller at rotate speed DC motor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 846, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.

- [3]. Deshpande, A. V. (2021). Comparison of Fuzzy Logic Controller with PID Controller in Induction Motor Control. *Asian Research Journal of Current Science*, 194-198.
- [4]. Han, J., Shan, X., Liu, H., Xiao, J., & Huang, T. (2023). Fuzzy gain scheduling PID control of a hybrid robot based on dynamic characteristics. *Mechanism and Machine Theory*, 184, 105283.
- [5]. Hartono, H., Sudjoko, R. I., & Iswahyudi, P. (2019, November). Speed control of three phase induction motor using universal bridge and PID controller. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1381, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
- [6]. Isdaryani, F., Feriyonika, F., & Ferdiansyah, R. (2020, February). Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen Coon tuning method for magnetic levitation control system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1450, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- [7]. Maghfiroh, H., Saputro, J. S., Adriyanto, F., Sujono, A., & Lambang, R. L. (2021, March). Performance evaluation of fuzzy-PID in speed control of three phase induction motor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1096, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- [8]. Muntashir, A. A., Purwanto, E., Nugraha, S. D., Apriyanto, R. A. N., & Fakhruddin, H. H. (2020). Pengembangan Sugeno Fuzzy Model Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan V/F Scalar Control. *PoliGrid*, 1(2), 65-73.
- [9]. Muntashir, A. A., Purwanto, E., Sumantri, B., Fakhruddin, H. H., & Apriyanto, R. A. N. (2021). Static and Dynamic Performance of Vector Control on Induction Motor with PID Controller: An Investigation on LabVIEW. *Automotive Experiences*, 4(2), 83-96.
- [10]. Mugheri, N. H., & Keerio, M. U. (2021). An Optimal Fuzzy Logic-based PI Controller for the Speed Control of an Induction Motor using the V/F Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(4), 7399-7404.
- [11]. Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols Tuning Method: Understanding the PID Controller. *Resonance*, 25(10), 1385-1397.
- [12]. Purwanto, E., Muntashir, A. A., & Rusli, M. R. (2023). Kendali Motor Sangkar Tupai 3 Fasa berbasis Indirect Field Oriented Control (IFOC) dengan PID Controller. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(3), 649.
- [13]. Suda, Kadek Reda Setiawan. "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan Pemodelan Sistem (Dtc) Direct Torque Control." *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan* 18.2 (2021): 237-248.
- [14]. Swami, H., & Jain, A. K. (2021, June). An improved scalar controlled drive based on steady state model of vector controlled drive for squirrel cage induction motor. In *2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [15]. Hartono, H., Sudjoko, R. I., & Iswahyudi, P. (2019, November). Speed control of three phase induction motor using universal bridge and PID controller. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1381, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
- [16]. Maghfiroh, H., Saputro, J. S., Adriyanto, F., Sujono, A., & Lambang, R. L. (2021, March). Performance evaluation of fuzzy-PID in speed control of three phase induction motor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1096, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- [17]. Hammoodi, S. J., Flayyih, K. S., & Hamad, A. R. (2020). Design and implementation speed control system of DC motor based on PID control and matlab simulink. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(1), 127-134.
- [18]. Sushita, K., & Shanmugasundaram, N. (2021). Performance and comparative analysis of bldc motor with pi and pid controllers. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 219-228.
- [19]. Nasser, A., & Szemes, P. T. (2018). Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Scalar Method and PID Controller. *Recent Innovations in Mechatronics*, 5(1.), 1-5.
- [20]. Kumar, Y., & Gupta, H. (2022, June). Design and modelling of speed control of three phase IM based on PID controller. In *2022 2nd international conference on intelligent technologies (CONIT)* (pp. 1-5). IEEE.