

PEMODELAN SISTEM FOC KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN PI CONTROLLER

S. M. Andriami¹⁾, E. Purwanto²⁾, H. Oktavianto³⁾, K. R. S. Suda⁴⁾, A. A. Muntashir⁵⁾

¹²³Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

⁴Fakultas Teknik dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Ganesha

⁵Teknik Mekatronika, Politeknik Astra

Email: srimumtiah@pasca.student.pens.ac.id, era@pens.ac.id, hary@pens.ac.id, ksuda@undiksha.ac.id, abdillah.muntashir@polytechnic.astra.ac.id

ABSTRAK

Pengaturan kecepatan pada motor induksi 3 fasa ini menggunakan PI Controller dengan menerapkan metode Field Oriented Control (FOC) salah satu bagian dari metode vector control. Salah satu sistem yang dikembangkan pada penelitian ini adalah pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa dengan pemodelan system Field Oriented Control (FOC) dengan pengontrol kecepatan menggunakan PI Controller, hasil yang diperoleh dari pengaturan kecepatan yaitu untuk mencapai keadaan steady hanya membutuhkan waktu 1 sampai 2 sekon dengan rata-rata error stedy 1,175% dengan rise time dan overshoot yang tidak terlalu besar. Dengan pemodelan system FOC menggunakan PI Controller ini mampu mengatasi kelemahan pada kecepatan motor induksi serta memberikan kreteria performa sistem kontrol yang tinggi, dengan menekan overshoot dan steady state error mendekati nol, serta rise time dan settling time relatif cepat dibandingkan dengan open loop controller.

Kata kunci: FOC, Motor Induksi, PI Controller

ABSTRACT

The speed regulation on this 3-phase induction motor uses a PI Controller by applying the Field Oriented Control (FOC) method, one part of the vector control method. One of the systems developed in this study is the speed control of a 3-phase induction motor by modeling the Field Oriented Control (FOC) system with a speed controller using a PI Controller, the results obtained from speed regulation are that to achieve steady state it only takes 1 to 2 seconds with Steady error average is 1.175% with not too big rise time and overshoot. By modeling the FOC system using the PI Controller, it is able to overcome the weakness in the speed of the induction motor and provide high control system performance criteria, by suppressing the overshoot and steady state error to close to zero, and the rise time and settling time are relatively fast compared to the open loop controller.

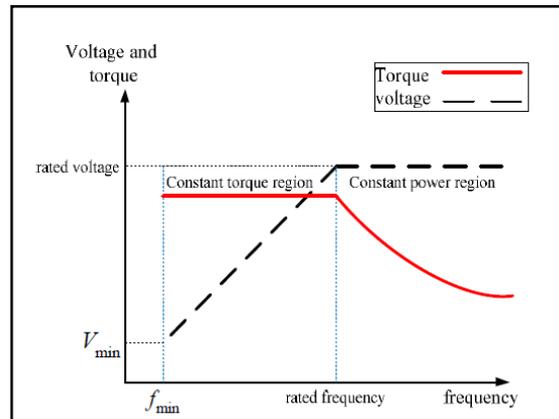
Keywords : FOC, Induction Motor, PI Controller

1. PENDAHULUAN

Motor induksi 3 fasa adalah alat penggerak yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang sederhana, kokoh, harganya relatif murah, serta perawatannya yang mudah, sehingga motor induksi mulai menggeser penggunaan motor DC pada industri. Motor induksi memiliki beberapa parameter yang bersifat non-linier, terutama resistansi rotor, yang memiliki nilai bervariasi untuk kondisi operasi yang berbeda. Hal ini yang menyebabkan pengaturan pada motor induksi lebih rumit dibandingkan dengan motor DC. Salah satu kelemahan dari motor induksi adalah tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan beban. Apabila terjadi perubahan beban maka kecepatan motor induksi akan menurun. Untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi terhadap perubahan beban, maka dibutuhkan suatu pengontrol [1].

Pada Pengendali motor induksi terbagi atas dua metode, kontrol skalar dan vector kontrol. Kontrol skalar mempunyai kekurangannya dalam kestabilan pada kecepatan tinggi dan performa dinamik yang rendah. Pada pengaplikasian, *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 [2]. Selain itu, Pada pengoperasian kecepatan rendah mengakibatkan drop tegangan yang cukup besar sehingga kemampuan torsi buruk (torsi turun). Sehingga penggunaan *scalar control* kurang cocok pada kecepatan rendah [3], seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Karakteristik *Scalar Control*

Berdasarkan grafik diatas bahwa pada pengoperasian kecepatan tinggi, drop tegangan yang melewati resistansi dan induktansi stator dapat diabaikan karena nilainya kecil, tetapi pada pengoperasian kecepatan rendah, drop tegangan yang melewati resistansi dan induktansi stator tidak boleh diabaikan karena nilainya besar. Rendahnya pengoperasian kecepatan mengakibatkan drop tegangan yang cukup besar sehingga kemampuan torsi buruk (torsi turun). Sehingga penggunaan skalar kontrol kurang cocok pada kecepatan rendah [4].

Berbeda dengan *vector control*, pada metode ini merubah sistem dari *coupled* menjadi *decoupled*, motor induksi dapat dikontrol seolah-olah seperti motor DC penguat terpisah, sehingga memungkinkan pengontrolan variabel secara terpisah. Variabel yang dimaksud adalah fluksi dan torsi. Dengan penggunaan *vector control* memiliki performa yang tinggi, mampu untuk mengatur fluksi, torsi, tegangan, arus vektor, dan mampu menghasilkan torsi yang tinggi pada kecepatan rendah. *Vector control* memiliki respon yang baik pada setiap variasi kecepatan dan beban serta lebih konstan. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Sankeh Saha dan kawan-kawan membahas tentang analisa komparasi *scalar control* dengan *vector control* untuk kendaraan listrik dapat diketahui bahwa *vector control* memiliki *tracking* kecepatan yang cepat serta mengkonsumsi lebih sedikit energy sehingga efisiensi lebih besar dibanding dengan *scalar control* [5]. Metode kontrol vector atau yang lebih dikenal dengan teknik *Field Oriented Control* (FOC) sering digunakan pada penggerak motor induksi berkinerja tinggi. Hal ini memungkinkan, melalui transformasi koordinat, untuk memisahkan kontrol torsi elektromagnetik dari fluks rotor, sehingga seolah-olah mengatur motor induksi sebagai motor DC. Kontrol decoupling antara fluks dan torsi memungkinkan induksi motor untuk mencapai respons transien cepat. Oleh karena itu, lebih disukai digunakan dalam aplikasi motor berkinerja tinggi. Pada FOC dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *direct* FOC dan *indirect* FOC. Hal yang membedakan antara DFOC dan IFOC yaitu penggunaan sensor hall-effect untuk mengukur fluksi pada celah udara atau fluks diperoleh dari formulasi. Penggunaan sensor tambahan disini membutuhkan banyak biaya serta, susah ditempatkan karena berada di celah udara motor. Selain itu, Hasil pembacaannya tidak akurat terutama pada kecepatan rendah. Sehingga diantara DFOC dan IFOC, yang sering digunakan dalam beberapa literatur yaitu IFOC [6].

Pengaturan kecepatan yang dianggap baik adalah pengaturan kecepatan yang menghasilkan stady state lebih awal. Untuk mencapai kecepatan stady state lebih awal maka pengendalian kecepatan putaran motor induksi dapat dilakukan beberapa cara diantaranya mengendalikan frekuensi dan tegangan inverter secara berimbang dengan mencari nilai konstan, serta memberikan nilai tetap pada tegangan dan mengatur frekuensi agar jauh lebih tinggi dari frekuensi fundamental. Maka untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi dibuatlah metode *Indirect Field Oriented Control* (IFOC) yaitu suatu metode pengaturan torsi tidak langsung pada motor induksi tiga fasa. Untuk mengatasi kompleksitas di dalam pengaturan motor induksi maka diperlukan suatu metode pengaturan yang dapat mengatur kecepatan motor induksi seperti mengatur kecepatan motor DC. Salah satu metode pengaturan motor induksi adalah metode vektor kontrol yang berdasarkan hubungan pada kondisi dinamik [7]. Pada metode vektor kontrol tidak hanya mengatur

besar dan frekuensi kecepatan angular tetapi juga mengatur posisi dari vektor ruang tegangan, arus dan fluks stator.

Pada penelitian ini speed kontroler berbasis *PI* mampu mengikuti perubahan kecepatan (setpoint) dengan cepat (fast response) sehingga hasil respon perubahan kecepatan penggunaan kontroler *PI* mampu memberikan kriteria performansi sistem kontrol tinggi, dengan menekan overshoot dan steady state error mendekati nol serta rise time dan settling time relatif cepat. Berbagai permasalahan dalam mengendalikan kecepatan motor induksi 3 fasa, maka penelitian ini dilakukan dengan memodelkan sistem IFOC pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan menggunakan *PI controller*. Pemodelan diterapkan lewat sebuah simulasi pemodelan *software* memakai fasilitas pada Simulink serta *Power System Blockset* dari MATLAB 6.0.

2. METODE

Model Dinamis Motor Induksi 3 Fasa

Model dinamis dari suatu motor induksi dalam kerangka acuan stasioner (*stationary reference frame*), dapat dinyatakan sebagai Persamaan (1), (2), (3), (4) [14]:

Voltages Equations:

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \quad (1)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \quad (2)$$

Flux Equations:

$$[\varphi_{sabc}] = [L_{os}][i_{sabc}] + [M_{osr}][i_{rabc}] \quad (3)$$

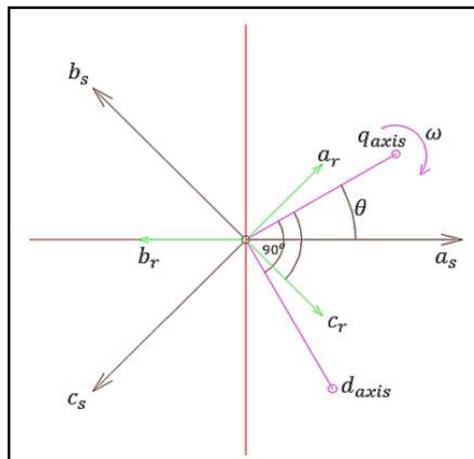
$$[\varphi_{rabc}] = [L_{or}][i_{rabc}] + [M_{osr}][i_{sabc}] \quad (4)$$

Penjelasan dari perumusan diatas dapat dijabarkan dalam bentuk matrix yang ditunjukkan pada Persamaan (5), (6), (7) [8], untuk Gambar 2 merupakan Transformasi ABC dan dq0 pada *Stationary Reference Frame*.

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[M_{osr}] = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$



Gambar 2. Relasi Transformasi ABC dan dq0 pada *Stationary Reference Frame*

Secara ideal motor induksi 3 fasa diasumsikan dalam kondisi simetris. Kerangka referensi dq0 biasanya diletakkan bergantung pada posisi kecocokan terhadap komponen-komponen analisis motor yang digunakan. Pada penelitian ini Model dinamis dari suatu motor induksi menggunakan kerangka

acuan stasioner (*stationary reference frame*) sebagai referensi dq0. Untuk mentransformasikan kondisi abc menjadi dq0, pertama yang harus dilakukan adalah menentukan arah putar rotor pada kondisi stasioner (tak berubah) [9]. Pada kondisi ini $\omega = 0$, relasi antara besaran abc dan besaran dq0 pada referensi stasioner saat kecepatan sebesar ω dapat dilihat pada Gambar 3. Pada notasi abc_r , menunjukkan besaran fasa abc pada rotor, pada notasi abc_s , menunjukkan besaran fasa abc pada stator, dan dq axis menunjukkan besaran transformasi dq0 **Invalid source specified..**

Besaran transformasi abc menjadi dq0 dengan kerangka acuan stasioner ditunjukkan pada Persamaan (8):

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = T_{dq0}(\theta) \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Variabel f dapat diartikan sebagai fungsi tegangan tiap fasa, arus, ataupun fluks motor.

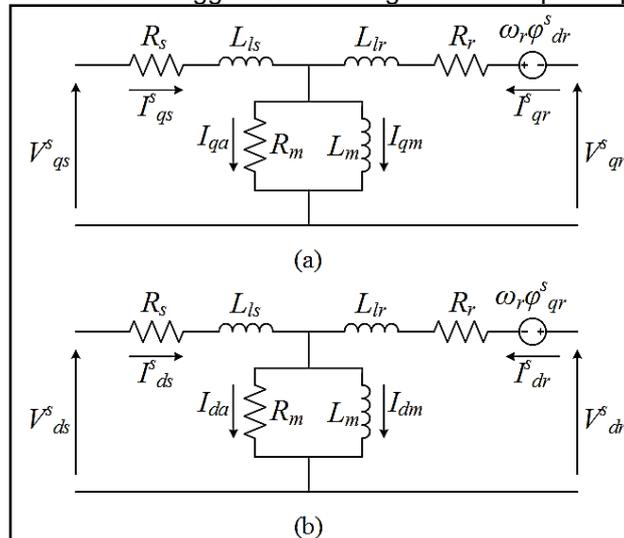
Besarnya $T_{dq0}(\theta)$ dijabarkan pada Persamaan (9) :

$$[T_{dq0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dan inverse dari $T_{dq0}(\theta)$ dijabarkan pada Persamaan (10) :

$$[T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Rangkaian ekuivalen motor induksi menggunakan kerangka acuan dq0 nampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Ekuivalen Sumbu d-q dalam Kerangka Acuan Stasioner: (a) Rangkaian Sumbu q; (b) Rangkaian Sumbu d.

Berdasarkan rangkaian ekuivalen tersebut dapat dijabarkan dalam Persamaan (11)-(21):

$$V_{qs}^s = R_s I_{qs}^s + \frac{d}{dt} \varphi_{qs}^s \quad (11)$$

$$V_{ds}^s = R_s I_{ds}^s + \frac{d}{dt} \varphi_{ds}^s \quad (12)$$

$$R_m I_{qa} = L_m \frac{d}{dt} I_{qm} \quad (13)$$

$$R_m I_{da} = L_m \frac{d}{dt} I_{dm} \quad (14)$$

$$I_{qm} + I_{qa} = I_{qs}^s + I_{qr}^s \quad (15)$$

$$I_{dm} + I_{da} = I_{ds}^s + I_{dr}^s \quad (16)$$

$$\varphi_{qs}^s = L_{ls} I_{qs}^s + L_m I_{qm} \quad (17)$$

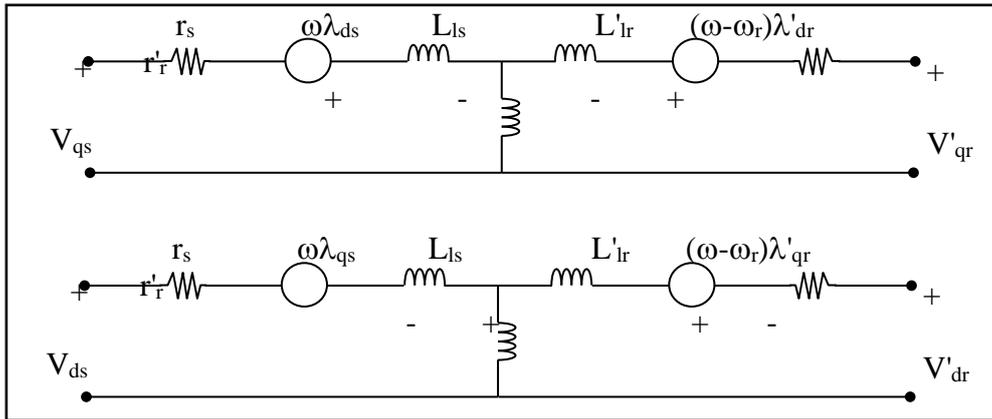
$$\varphi_{ds}^s = L_{ls} I_{ds}^s + L_m I_{dm} \quad (18)$$

$$\varphi_{qr}^s = L_{lr} I_{qr}^s + L_m I_{qm} \quad (19)$$

$$\varphi_{dr}^s = L_{lr} I_{dr}^s + L_m I_{dm} \quad (20)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} \left(\varphi_{dr}^s (I_{qs}^s - I_{qa}) - \varphi_{qr}^s (I_{ds}^s - I_{da}) \right) \quad (21)$$

Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekivalen motor induksi dalam koordinat d-q.



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Sumbu d-q

Untuk mentransformasikan persamaan dari sistem koordinat a-b-c ke sistem koordinat d-q, maka gunakan persamaan (22), dimana variabel f dapat berupa tegangan, arus maupun fluksi sebagai berikut [10]:

$$f_{qds} = T(\theta) f_{abcs} \quad (22)$$

Persamaan (23) Tegangan Stator

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s + j \omega_s \vec{\lambda}_s \quad (23)$$

dimana:

$$\vec{V}_s = v_{ds} + j v_{qs} \quad (24)$$

$$\vec{I}_s = i_{ds} + j i_{qs} \quad (25)$$

$$\vec{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j \lambda_{qs} \quad (26)$$

Persamaan (27) Tegangan Rotor

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j(\omega_s - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (27)$$

dimana Persamaan (28)-(31):

$$\vec{V}_r = v_{dr} + j v_{qr} \quad (28)$$

$$\vec{I}_r = i_{dr} + j i_{qr} \quad (29)$$

$$\vec{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j \lambda_{qr} \quad (30)$$

Persamaan Torsi Elektromagnetik

Torsi elektromagnetik (T_e) merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor ditunjukkan pada Persamaan (31), sebagai berikut:

$$T_e = pM (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (31)$$

Kecepatan Angular

Kecepatan putaran rotor, dinyatakan sebagai fungsi dari torsi elektro-magnetik, torsi beban, yang dinyatakan sebagai ditunjukkan pada Persamaan (32) berikut :

$$\frac{J}{p} \frac{d}{dt} \omega_r + K_g \omega_r = T_e - T_l \quad (32)$$

Flux Linkage

Flux linkage didefinisikan sebagai besarnya medan putar (flux) pada kumparan (baik stator maupun rotor) dengan jumlah N lilitan. Masing-masing harga flux linkage baik pada rangkaian stator dan rotor pada Persamaan (33) dan (34) adalah:

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{I}_s + M \vec{I}_r \quad (33)$$

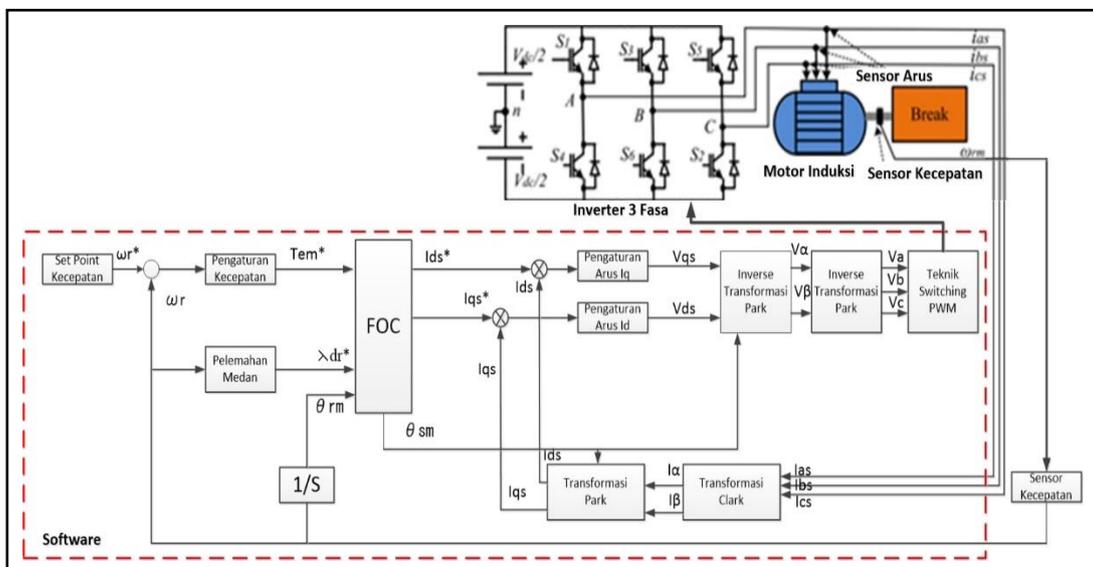
$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{I}_r + M \vec{I}_s \quad (34)$$

Indirect Field oriented Control (IFOC)

IFOC merupakan suatu metoda yang digunakan untuk mengatur medan pada motor induksi, dimana sistem *coupled* diubah menjadi sistem *decoupled*. Untuk dapat mengubah sistem ini maka komponen *flux* (λ_r) pada arus I_d harus di tempatkan selaras dengan sumbu d, dan komponen torsi (T_e) pada arus (I_q) harus ditempatkan selaras dengan sumbu q. Dengan sistem ini arus *flux* dan arus

torsi dapat diatur secara terpisah. Pada *Indirect Field Oriented Control* (IFOC) ini terdiri dari beberapa input yaitu T_e referensi (T_e^*), fluks rotor referensi (ϕ_{ir}^*), kecepatan motor (ω_r), dan arus stator (I_{abc}). Dalam IFOC terdapat blok subsystem seperti i_d^* calculation, i_q^* calculation, teta calculation, flux calculation, abc to dq conversion dan dq to abc conversion [11].

Kecepatan dan fluks pada skema IFOC ini diolah untuk membangkitkan pola switching SPWM inverter 3 fasa untuk kendali motor induksi 3 fasa agar beroperasi sesuai set point. Hasil pengolahan dari pemodelan motor induksi ini berupa posisi, kecepatan, fluks, dan arus saat motor bekerja berdasarkan model motor melalui pendekatan sesuai keadaan sesungguhnya. Skema IFOC ini diolah berdasarkan input dari arus output inverter 3 fasa. Dari 3 arus output inverter 3 fasa akan diambil 2 arus untuk diolah pada IFOC. Sehingga dari arus tersebut menghasilkan transformasi clark-park untuk proses kalkulasi posisi, fluks, dan arus motor yang didapatkan berdasarkan data aktual saat motor beroperasi. Selain itu keluaran dari sensor kecepatan akan diolah pada skema IFOC untuk menghitung nilai teta, serta digunakan sebagai pembanding dengan set point kecepatan. Pada penelitian ini pengaturan dilakukan pada speed controller, sehingga set point dari arus fluksi (I_d) diset 1 PU. Keluaran dari proses skema IFOC maka akan diinverskan kembali untuk menghasilkan sinyal pembangkitan dari SPWM. Vector kontrol merupakan pemodelan motor induksi yang kompleks yang mampu diatur semudah pengaturan motor DC penguat terpisah maka penggunaan metode ini pada motor induksi akan memisahkan pengaturan fluksi dengan pengaturan torsi. Pada blok sistem diatas terdapat beberapa variable yaitu Torsi referensi (T_e^*) merupakan variabel luaran dari unit kontroler berupa sinyal kontrol (u), dan merupakan masukan terhadap arus torsi (i_q). Arus torsi referensi (i_q^*) dan arus fluksi referensi (i_d^*), fluks (λ_r), teta (θ_e) serta kecepatan actual motor (ω_r) dan kecepatan referensi/set point (ω_r^*). Gambar 5 merupakan diagram blok dari IFOC [12].



Gambar 5. Blok Diagram IFOC

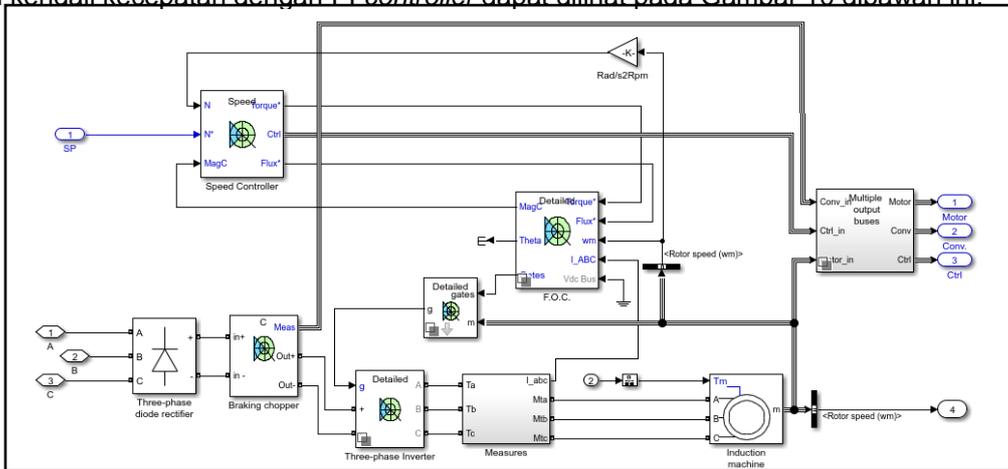
Telah banyak konsep yang menjelaskan proses pengukuran histeresis terhadap Vector control atau *field oriented control* (FOC) adalah suatu metode pengaturan medan pada motor AC, dimana dari sistem *coupled* dirubah menjadi sistem *decoupled*. Dengan sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, dengan demikian torsi dan fluks juga dapat diatur secara terpisah, seperti halnya motor DC. Metode FOC terdiri dari dua teknik yaitu *Direct FOC* (DFOC) dan *Indirect FOC* (IFOC). Teknik DFOC yaitu suatu teknik untuk mendapatkan vektor fluks rotor dengan cara melalui pengukuran langsung ke air gap. Sedangkan teknik IFOC adalah teknik untuk mendapatkan vektor fluks rotor dengan cara estimasi menggunakan persamaan FOC (*current mode*) yang membutuhkan sensor kecepatan sebagai *feedback* [13] [15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

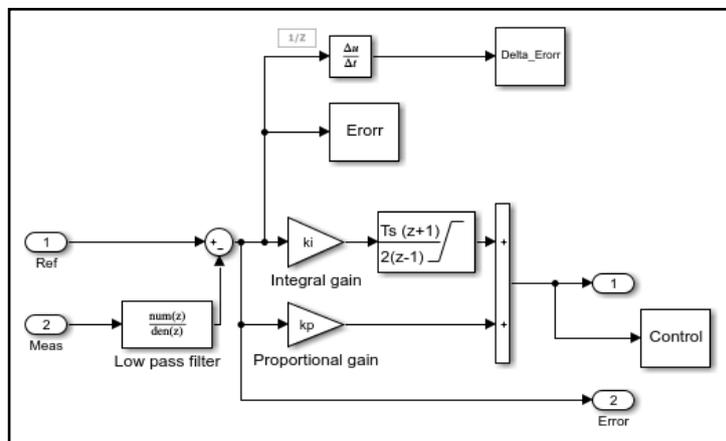
Berdasarkan pada landasan teori serta permasalahan yang ada maka perancangan sistem pada artikel ini harus melalui beberapa tahap. Sistem yang dibuat pada artikel ini bertujuan untuk pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa melalui tegangan output dan frekuensi dari *inverter* 3 fasa dengan metode FOC menggunakan *PI controller* pada motor induksi 3 fasa, sehingga diperoleh

sistem pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa yang sesuai dengan *set point* yang kita tentukan serta membandingkan hasil menggunakan PI controller dengan *open loop controller*.

Simulasi program dilakukan dengan memerhatikan hasil simulasi dari kecepatan motor induksi tanpa dibebani dengan pengontrol PI yang kemudian data dari hasil simulasi tersebut akan dibandingkan dengan *open loop controller*. Blok simulasi FOC terlihat pada Gambar 4. Untuk blok simulasi kendali kecepatan dengan PI controller dapat dilihat pada Gambar 10 dibawah ini.



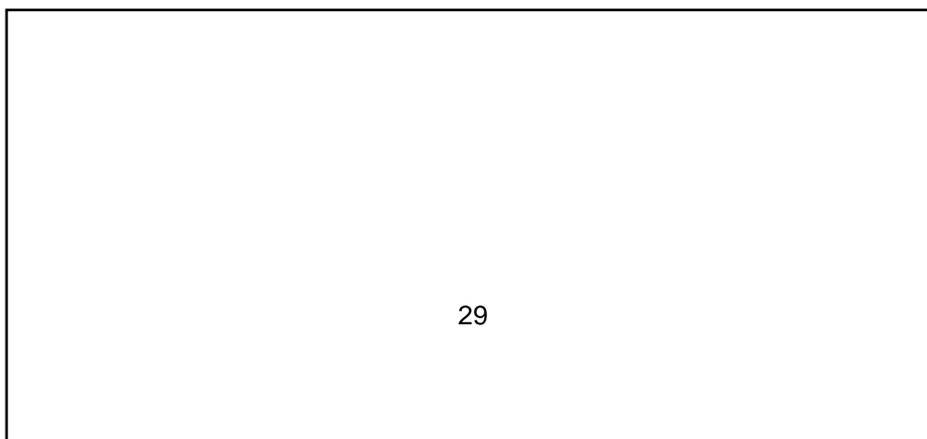
Gambar 4. Blok Simulasi FOC

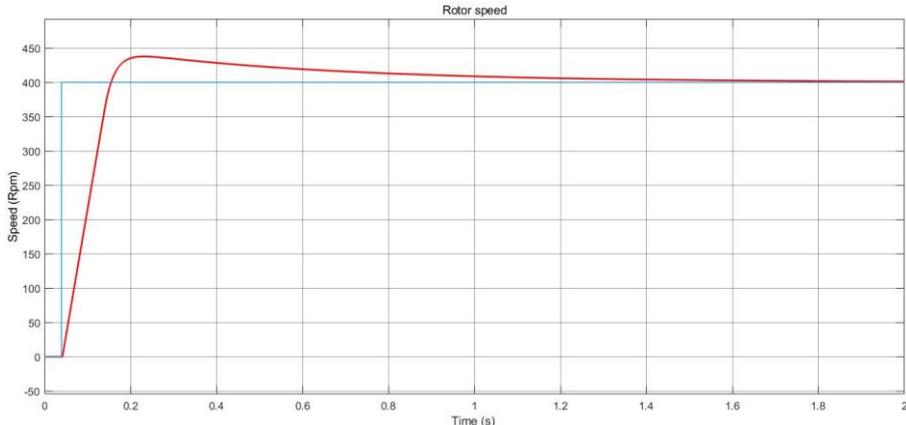


Gambar 5. Blok Speed Controller pada FOC menggunakan PI Controller

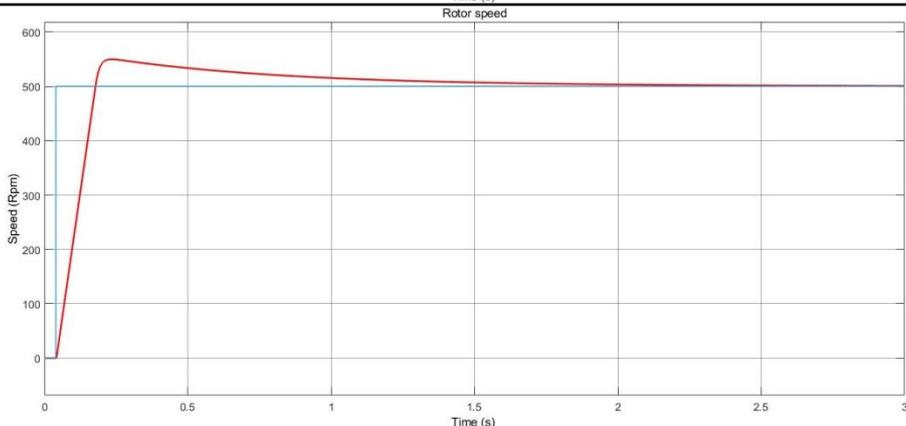
Pada fokus penelitian ini, PI controller diterapkan pada pengaturan kecepatan motor induksi yang nantinya akan dibandingkan dengan *open loop controller*. Pengujian dilakukan dengan kondisi yang bervariasi, yaitu kecepatan konstan dari setpoint rendah menengah sampai setpoint maksimal nominal kecepatan motor induksi. Begitupula dengan pengujian pembebanan, dilakukan dengan tanpa beban dan beban konstan. Dalam evaluasi performa kecepatan konstan untuk menentukan karakteristik respons transient dari sistem kontrol yang perlu diperhatikan yaitu sebagai berikut: 1. *Rise time* (t_r), 2. *Maximum overshoot* (M_p) 3. *Settling time* (t_s) dan *error steady*.

Pengujian pertama dengan PI controller tanpa beban yaitu dengan referensi kecepatan tetap. Referensi kecepatan dimulai dari 400 rpm, 500 rpm, 1000 rpm, 1300 rpm, dan 1500 rpm. Gambar 6 merupakan performa respon kecepatan dari pengoperasian motor induksi.

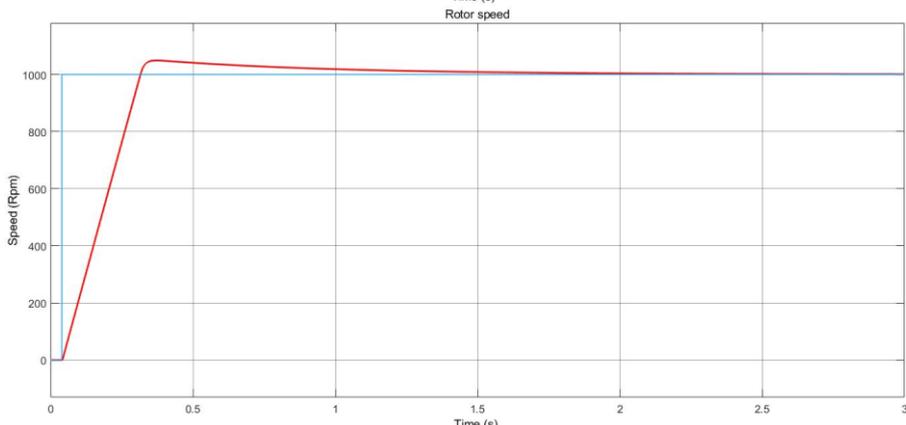




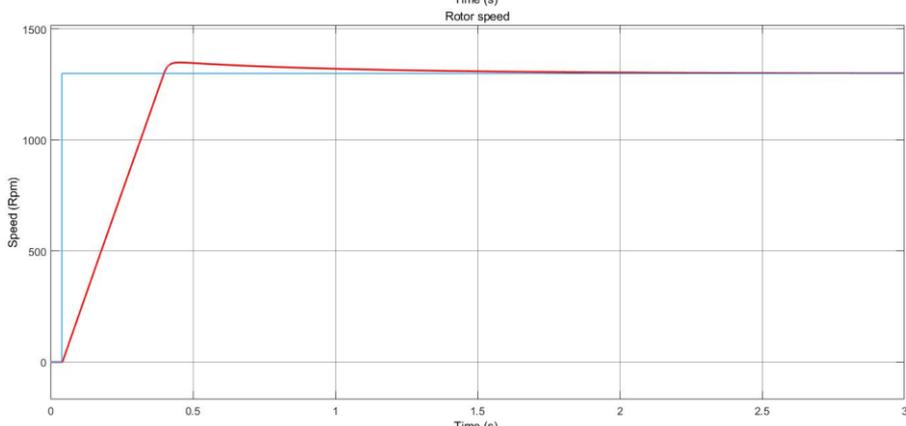
(a)



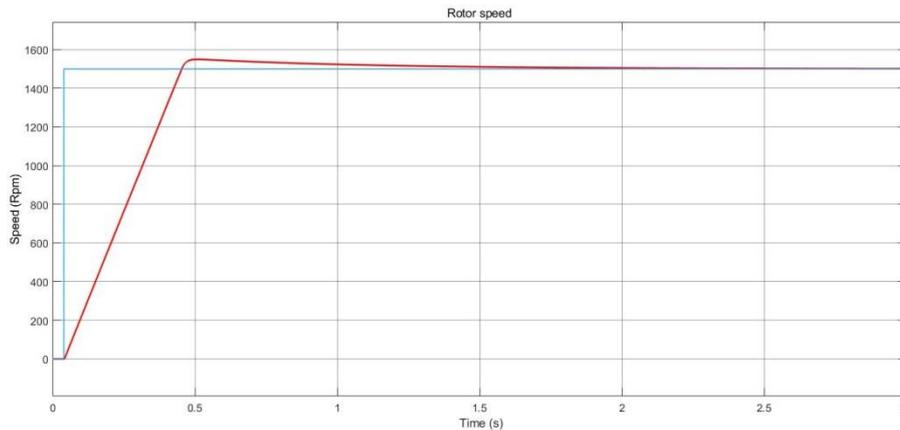
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 6. Performa Respon Kecepatan dengan Metode FOC menggunakan PI Controller (a) 400 Rpm, (b) 500 Rpm, (c) 1000 Rpm, (d) 1300 Rpm, (e) 1500 Rpm

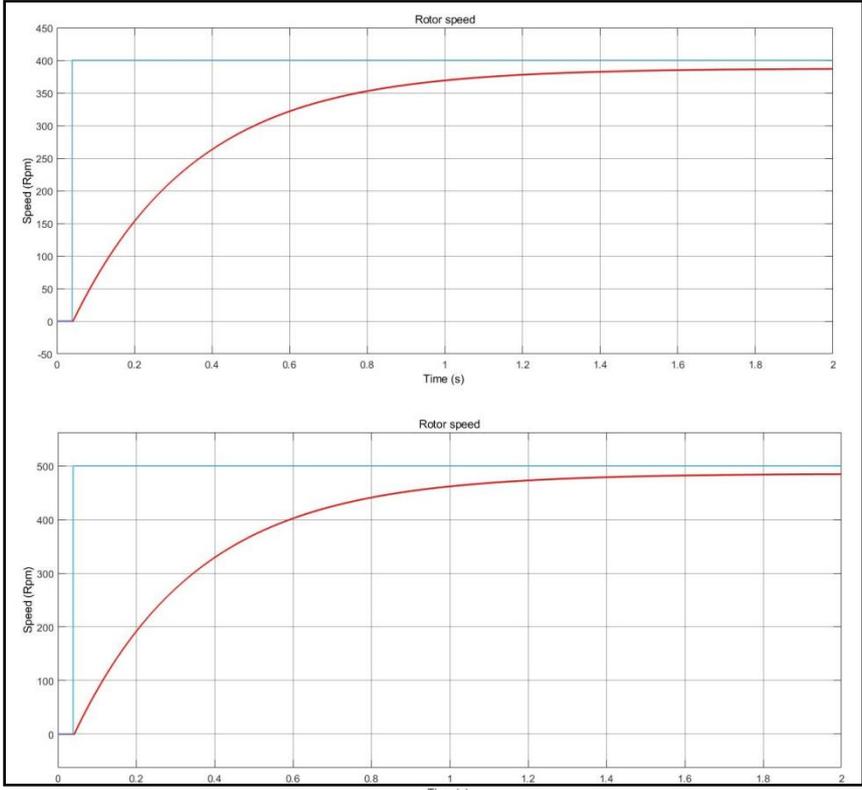
Analisis performa kecepatan dengan PI control pada Gambar 6 yaitu respon kecepatan yang dihasilkan dengan beberapa setpoint mulai dari setpoint 1100 rpm, 1300 rpm, dan 1435 rpm menghasilkan respon yang lumayan bagus namun ada sedikit overshoot yang terjadi pada hasil respon tersebut. Respon performa PI control dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Respon Performa Kecepatan dengan PI Kontrol Tanpa Beban

Set Point (Rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Error Steady (%)
400	0,87	1,8	8,152	1,25
500	0,109	2,2	9,341	0,8
1000	0,218	1,6	4,737	0,5
1300	0,284	1,8	3,646	0,4
1500	0,330	2	2,577	0,2

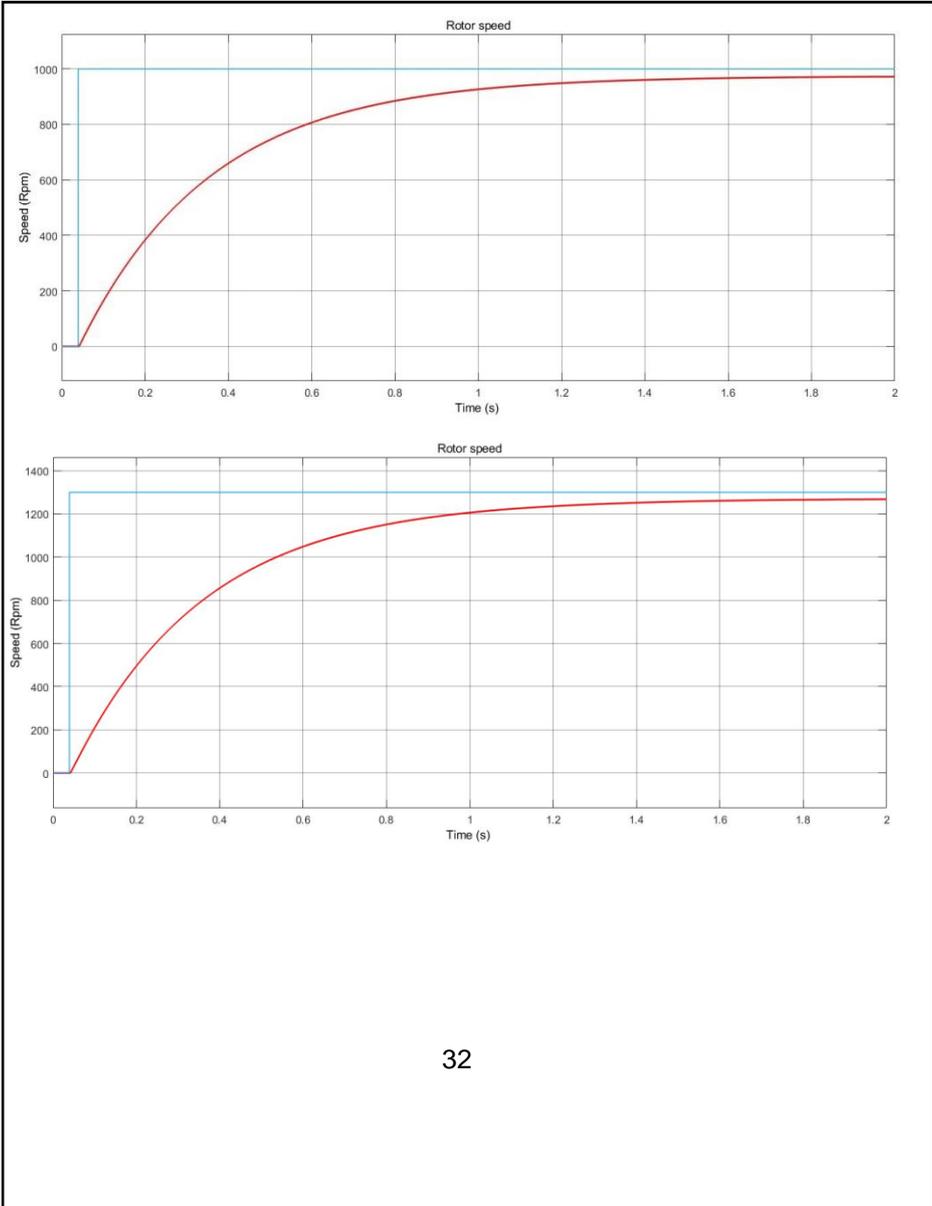
Respon performa kecepatan yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4 hasil simulasi hampir menyerupai respon dari beberapa setpoint yang ditentukan. Keadaan steady dari respon kecepatan hanya membutuhkan sekitar 2 detik, serta eror steady yang dihasilkan dari respon kecepatan tersebut sangat kecil atau rata-rata tidak mencapai 1%, rise time yang diperlukan tidak mencapai 2 detik, sehingga dengan PI controller ini dikatakan sangat berhasil dalam melakukan pengaturan kecepatan motor induksi untuk menghasilkan respon kecepatan yang maksimal dan dinamis walaupun dalam keadaan kecepatan atau setpoint yang rendah.

Pengujian kedua dengan *open loop controller* dengan referensi kecepatan tetap. Referensi kecepatan dimulai dari 400 rpm, 500 rpm, 1000 rpm, 1300 rpm, dan 1500 rpm. Gambar 7 merupakan performa respon kecepatan dari pengoperasian motor induksi.



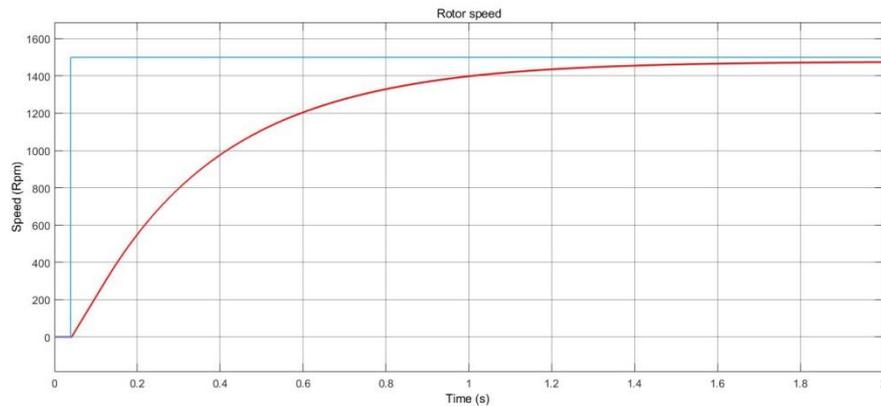
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Gambar 7. Performa Respon Kecepatan dengan Metode FOC menggunakan *Open Loop Controller* (a) 400 Rpm, (b) 500 Rpm, (c) 1000 Rpm, (d) 1300 Rpm, (e) 1500 Rpm

Analisis performa kecepatan dengan *open loop controller* pada Gambar 7 yaitu respon kecepatan yang dihasilkan dengan beberapa setpoint mulai dari setpoint 1100 rpm, 1300 rpm, dan 1435 rpm menghasilkan respon yang lumayan bagus namun ada sedikit overshoot yang terjadi pada hasil respon tersebut. Respon performa *open loop controller* dapat dilihat pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Respon Performa Kecepatan dengan *open loop controller*

Set Point (Rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Error Steady (%)
400	0,85	1,5	4,25
500	0,9	1,45	2,8
1000	0,9	1,7	1,5
1300	0,7	1,8	1,5
1500	0,8	1,9	1,3

Respon performa kecepatan yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 5 hasil simulasi tidak mencapai set point yang diberikan. Sehingga dengan open loop controller disarankan menggunakan beberapa controller pada kecepatan motor induksi 3 fasa untuk mencapai keadaan steady dengan cepat dan mencapai setpoint sesuai referensi yang diberikan. Hasil simulasi yang dilakukan dapat dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yaitu pengendalian motor induksi 3 fasa dengan metode FOC pengendali control F/V, dimana control motor induksi 3 fasa dengan pengendali PI controller hasilnya lebih bagus dan rise time yang dihasilkan dalam kecepatan rendah yaitu 0,87s tidak mencapai 1 detik. Hasil simulasi yang bagus ini memberikan performa motor yang stabil walaupun dalam kecepatan rendah. Namun ada beberapa kendala yang dialami dalam penelitian ini yaitu, belum dapat dilakukan implementasi secara langsung untuk menguji hasil simulasi yang sudah dilakukan. Penelitian selanjutnya yang akan dilakukan yaitu mengganti controller dengan menggunakan pengendali Neuro-Fuzzy dalam melakukan pengendalian motor induksi 3 fasa dengan metode FOC.

4. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap pengendalian kecepatan motor induksi dengan metode FOC menggunakan PI *Controller* dapat digunakan untuk mensimulasikan sistem sebenarnya. Pada percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa Penggunaan PI *controller* mampu memberikan kriteria performansi sistem kontrol yang tinggi, dengan menekan overshoot dan steady state error mendekati nol, serta rise time dan settling time relatif cepat. Peningkatan performa kecepatan motor induksi 3 fasa dalam keadaan berbeban ataupun tanpa beban hasil respon simulasi kecepatan motor induksi juga menghasilkan respon yang bagus dan sangat tepat digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. H. Z. Evalina, "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa," *Journal of Electrical Technology*, pp. 73-80, 2018.
- [2] R. Iqbal, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode Vektor Kontrol Berbasis Jaringan Syaraf Tiruan Radial Basis Function–PD (JST RBF–PD) Hybrid (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember)," 2015.
- [3] M. M. M. & E. E. Alizadeh, "Closed loop speed control of induction motor using constant v/f applying spwm and svm based inverter," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, pp. 6(5), 234-241, 2017.
- [4] S. J. R. Y. H. Y. W. J. & J. L. Rind, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, pp. 1-17, 2017.
- [5] S. N. M. P. T. R. N. & P. T. Saha, "Comparative Analysis between Direct Torque Control and v/f Control for Electric Vehicles," *International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1-6, 2020.
- [6] H. S. Schultz., "Comparing AC Induction with Permanent Magnet motors in hybrid vehicles and the impact on the value proposition," *Parker Hannifin Corporation*, pp. 1-15, 2015.
- [7] K. R. S. Suda, "Pengaturan Kecepatanmotor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan Pemodelan Sistem (DTC) Direct Torque Control," *JPTK (Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan)*, vol. 18, no. 2, pp. 237-248, 2021.
- [8] S. H. a. M. A. Bazaz, "Review of Vektor Control Strategies for Three Phase Induction Motor Drive," in *International Conference on Recent Developments in Control*, Noida, 2015.
- [9] E. P. H. O. A. A. M. K. R. S. S. R. O. Y. Hendra, "Pengendalian Motor Induksi 3 Fasa Dengan Beban Dinamis Kontrol Pid Fuzzy Menggunakan Metode FOC-Tak Langsung (Indirect Field Oriented Control) Pada LABVIEW," *JPTK (Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan)*, vol. 19, no. 1, pp. 45-55, 2022.
- [10] A. B. Ashari, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 03, pp. 763-771, 2020.
- [11] S. A. F. F. S. J. S. S. S. Y. T. S. A. Andri Ramadhan, "Perancangan Dan Implementasi Field Oriented Control (FOC) dan PID Didalam Koordinasi Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa," *Seminar Nasional Teknologi Komputer & Sains (SAINTEKS)*, pp. 187-191, 2019.
- [12] J. K. Rizana Fauzi, "Pemodelan Direct Quadrate (D-Q) Pada Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Field Oriented Control (FOC) Berbasis Kendali P-I," *ScientiCO : Computer Science and Informatics Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 25-35, 2018.
- [13] I. F. E. P. Nibras Syarif Ramadhan, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode Field Oriented Control (FOC) Pada Mobil Listrik," *Jurnal INOVTEK Seri Elektro*, vol. 3, no. 3, pp. 133-143, 2021.
- [14] E. P. S. D. N. Abdillah Aziz Muntashir, "Rancang Bangun Inverter 3 Fasa dengan Metode V/F Scalar Control pada Mobil Listrik," *INOVTEK-Seri Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 102-112, 2020.
- [15] E. P. B. S. A. A. M. R. O. Y. H. Kadek Reda Setiawan Suda, "Pemodelan Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fasa menggunakan Pengendali Neuro-Fuzzy Melalui Metode Direct Torque Control," *ELKOMIKA Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 10, no. 4, pp. 888-902, 2022.