

Analisis Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Metode *Direct Torque Control* (DTC) Berbasis PID Kontrol

Mokh Suseno Aji Sari¹, Hadi Suyono², Abraham Lomi³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya¹

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya³

m.susenoajisari@gmail.com, *hadis@ub.ac.id, abraham@itn.ac.id.

ABSTRACT

This research was conducted to regulate the three phase induction motor speed regulation system. Changes in load on the motor affect the motor speed response so it does not match the set point speed. This study uses the Direct Torque Control (DTC) method in regulating the speed of an induction motor. The DTC method is a vector control method that is directly assigned to the inverter. DTC method in controlling speed based on Proportional Integral Differential (PID) control. Determination of PID tuning using two methods, namely, ziegler-nichols and cohen-coon method. The ziegler-nichols method have overshoot speeds starting at 0.8% of the setpoint, whereas using the cohen coon method there is no overshoot and the speed at stable conditions matches the setpoint.

Keywords: *Direct Torque Control, 3-phase Induction Motor, PID Control, Tuning.*

INTISARI

Penelitian ini dilakukan untuk merencanakan sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa. Perubahan beban pada motor induksi mempengaruhi respon kecepatan motor sehingga tidak sesuai dengan kecepatan *set point*. Penelitian ini menggunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) dalam pengaturan kecepatan motor induksi. Metode DTC merupakan metode vektor kontrol yang langsung mengatur *switching* pada *inverter*. Metode DTC dalam mengendalikan kecepatan berbasis *Proportional Integral Diferensial* (PID) kontrol. Penentuan *tuning* nilai PID menggunakan dua metode yaitu, *ziegler-nichols* dan metode *cohen-coon*. Hasilnya metode *ziegler-nichols* terdapat *overshoot* kecepatan *starting* sebesar 0.8% dari *setpoint*, sedangkan menggunakan metode *cohen coon* tidak terdapat *overshoot* dan kecepatan pada saat *steady state* sesuai dengan *setpoint*.

Kata kunci: *Direct Torque Control, Motor Induksi 3 fasa, Kontrol PID, Tuning.*

I. PENDAHULUAN

Motor listrik banyak diaplikasikan pada peralatan industri salah satunya adalah motor induksi. Motor induksi mempunyai kelemahan dalam pengendalian kecepatan hal ini dikarenakan sifat dari motor induksi yang tidak linear yaitu apabila terjadi kenaikan beban, maka kecepatan putaran motor tersebut menjadi pelan, sehingga diperlukan kontrol agar putaran tersebut stabil. Kontrol kecepatan dilakukan dengan mengatur besar kecilnya nilai frekuensi, tegangan input

stator [9]. Salah satu metode untuk kendali kecepatan motor induksi adalah dengan menganalisis hubungan kecepatan dan torsi motor induksi. Analisis kecepatan motor induksi dengan mengubah besaran yaitu tahanan rotor, induktansi rotor, magnitude tegangan terminal, dan *control* tegangan/frekuensi (v/f) yang disebut dengan besaran *Scalar Control* [10]. Kelemahan dari *Scalar Control* adalah respon kecepatan dan torsi yang belum mencapai nilai akurat. Hal ini dikarenakan kontrol fluks stator dan torsi menggunakan kontrol tidak langsung aatau

menggunakan sensor[11]. Timbul suatu metode lainnya yaitu vektor kontrol atau disebut dengan *field oriented control/ FOC*. Metode ini menggunakan loop kontrol untuk mengontrol torsi dan fluks yang pada umumnya menggunakan transformasi vektor.

Para peneliti mengembangkan metode lainya untuk mengendalikan kecepatan motor. Salah yaitu metode *Direct Torque Control (DTC)*. Metode ini merupakan salah satu skema kendali berdasarkan pengontrolan fluks stator dan torsi sehingga memberikan respon pada motor AC. DTC mempunyai kelebihan antara lain lebih sederhana, mempunyai performa yang baik, serta tidak sensitif terhadap perubahan parameter, khususnya tahanan stator, *sensor less*. DTC juga mempunyai kelemahan yaitu *ripple* torsi dan respon transien yang lambat selama *start-up*, serta tingginya faktor *noise* sehingga perlu di kontrol agar linear [6].

Prinsip kerja rangkaian DTC yaitu bekerja secara langsung mengatur kondisi *switching* pada inverter dengan *Space Vector Modulation*. Hal ini menyebabkan masih terjadi perubahan beban pada motor sehingga respon kecepatan motor akan turun, tidak sesuai dengan kecepatan *set point* yang diberikan[12]. Untuk mengatasi hal tersebut maka pada metode DTC kendali kecepatannya menggunakan PID (*Proporsional Integral Diferensial*) yang bertujuan untuk mengatur batas dari nilai referensi torsi sehingga dapat memperbaiki respon kecepatan motor pada kondisi *steady state* maupun pada saat terjadi perubahan beban pada motor agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pada penelitian ini penggunaan kontrol PID menggunakan 2 metode *tuning* dalam penentuan nilai K_p , K_i dan K_d yaitu metode *ziegler-nichols* dan metode *cohen-coon*.

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak – balik (AC) yang paling sering digunakan di

industri maupun rumah tangga. Motor ini memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, serta biaya pemeliharaan murah. Di samping itu motor ini memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak.

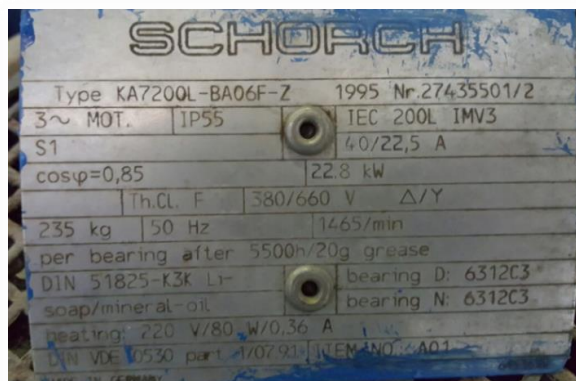
Motor induksi dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan konstruksi rotornya yaitu motor induksi rotor sangkar (*squirrel induction machine*) dan motor induksi rotor belitan (*wound induction machine*).

Prinsip kerja motor induksi sebagai berikut jika stator dialiri listrik maka akan menghasilkan medan magnet putar yang berputar dengan kecepatan sinkron (n_s) di sekitar rotor. Medan magnet akan menginduksi batang konduktor pada rotor sehingga menghasilkan arus rotor. Arus rotor akan menghassilkan medan magnet yang berusaha melawan medan magnet stator sehingga menyebabkan rotor akan berputar (N). perbedaan kecepatan tersebut disebabkan karena adanya slip/ geseran yang meningkat dengan meningkatnya beban. Dari kejadian ini maka dapat digunakan untuk menghintung persamaan slip/pegeseran [8].

Berikut adalah gambar motor induksi yang berada pada PLTGU IP Grati Blok 1.



Gambar 1. Kondisi motor ACWC (Air Cooled Water Cooler) di PLTGU IP Grati blok 1



Gambar 2. Nameplate motor ACWC.
(Sumber : PLTGU IP Grati)

B. Torsi Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Torsi mekanik (T_d) dapat dihitung dengan persamaan (1) dengan slip antara stator dan rotor persamaan (2) :

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{(1-s)}{\omega_m} (I_2')^2 \frac{R_2'}{s} \quad (1)$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad (2)$$

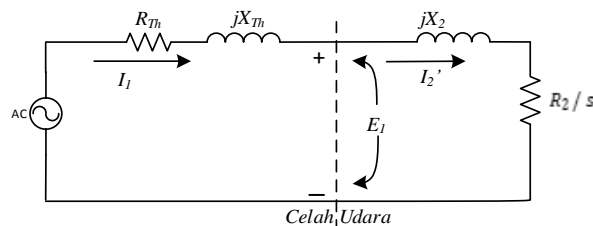
Dimana :

- T_d = torsi mekanik (N.m)
- ω_s = kecepatan sudut sinkron (rad/det).
- ω_m = kecepatan sudut poros rotor (rad/det)
- ω_m = $(1-s) \omega_s$.
- s = slip antara stator dan rotor.

Sehingga.

$$T_d = \frac{(I_2')^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_s} \quad (3)$$

Rangkaian ekuivalen dapat disederhanakan menjadi rangkaian thevenin seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Rangkaian ini nilai arus rotor (I_2') dapat dihitung, sehingga persamaan torsi yang diinginkan dapat diperoleh.



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen thevenin per fasa motor induksi tiga fasa [5].

dengan :

$$V_{th} = \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} V_\phi \quad (4)$$

$$Z_M = \frac{R_c jX_M}{R_c + jX_M} ; Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (5)$$

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (6)$$

Sehingga,

$$I_2' = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + Z_2} \quad (7)$$

$$I_2' = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + Z_2} \quad (8)$$

Maka besar arus adalah.

$$|I_2'| = \frac{V_{Th}}{\sqrt{(R_{Th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (jX_{Th} + jX_2)^2}} \quad (9)$$

Substitusi persamaan (8) ke persamaan (3) dan pengalihan dengan 3 (untuk torsi tiga fasa) diperoleh persamaan torsi mekanik total.

$$T_{d,3\phi} = \frac{3V_{Th}^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_s [(R_{Th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{Th} + X_2)^2]} \quad (10)$$

Dimana :

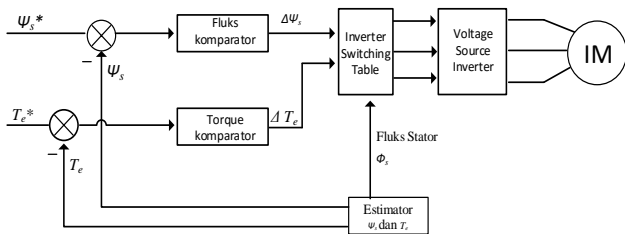
- $T_{d,3\phi}$ = torsi mekanik 3 fasa (N.m).
- V_{th} = tegangan pada rangkaian thevenin (volt).
- Z_{th} = impedansi rangkaian thevenin (Ω).
- R = Hambatan (Ω).

C. Metode Direct Torque Control (DTC)

Direct Torque Control (DTC) merupakan suatu teknik kontrol yang mengarah ke pengaturan torsi yang berubah-ubah sesuai dengan kebutuhan beban pada motor induksi. Skema Direct Torque Control (DTC) terdiri dari

dua pengaturan yaitu pengaturan fluks stator untuk menentukan lama waktu vektor tegangan aktif yang menggerakkan fluks stator pada lintasan referensi dan pengaturan torsi untuk menentukan lama waktu vektor tegangan nol, yang menahan torsi motor pada batas toleransi yang telah ditentukan [4].

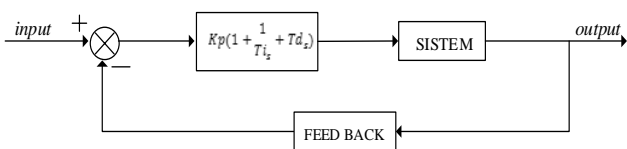
Diagram blok *Direct Torque Control* (DTC) dimana terdapat subblok diantaranya blok estimator, blok komparator, blok *switching table* dan blok *inverter* seperti yang ditunjukkan dengan gambar 4.



Gambar 4. Blok DTC pada motor induksi [1].

D. Metode Ziegler-Nichols

Pemilihan parameter alat kontrol agar menghasilkan spesifikasi kinerja disebut penyadapan alat kontrol (*control tuning*). Proses *ziegler-nichols* (berarti menyetel nilai K_p , T_i dan T_d) yang didasarkan pada respons fungsi tangga pada nilai K_p (kontrol proposional) sehingga menghasilkan kestabilan marginal. Metode *ziegler-nichols* dalam menentukan kendali *Proporsional Integral Diferensial* (PID) menggunakan aturan nilai penguatan proposional K_p waktu integral T_i dan waktu T_d yang didasarkan pada karakteristik respons transien [7]. Seperti yang dijelaskan pada gambar 5.



Gambar 5. Kontrol PID menggunakan sistem ziegler-nichols [7].

Tabel 1. Aturan Penyetelan *Ziegler Nichols* didasarkan pada penguatan K_{cr} dan Periode P_{cr} Kritis

Tipe Kontrol	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	~	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

E. Metode Cohen Coon

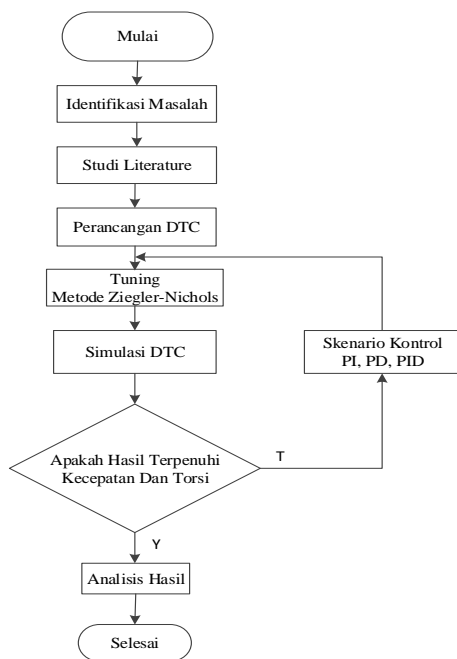
Metode *cohen-coon* desain utama dengan kriteria mempertahankan gangguan pada beban. Metode ini memposisikan kutub dominan dengan memberikan rasio peluruhan seperempat amplitudo (*Quarter Amplitude Decay*). Karena tidak semua proses dapat mentolelir keadaan osilasi dengan amplitudo, maka metode ini berupaya memperbaiki osilasinya sehingga memberikan keuntungan maksimum. Hal ini dapat berakibat akan meminimalkan kesalahan pada kondisi *steady state* yang dikarenakan terdapat gangguan pembebanan. Untuk *PI* dan *PID*, dikendalikan melalui penguatan integral $k_i = K/T_i$ yang di maksimalkan. Hal ini dimaksudkan agar meminimalisasi *IE* (*Integral error*), kesalahan integral karena gangguan pada beban langkah unit. Untuk kontrol *PID*, tiga kutub loop tertutup diberikan; dua kutub itu kompleks, dan kutub nyata ketiga diposisikan pada jarak yang sama dengan kutub lainnya. Pola kutub disesuaikan untuk memberikan rasio peluruhan amplitudo seperempat, dan jarak kutub ke titik asal yang disesuaikan untuk meminimalkan kesalahan integral [3].

Tabel 2. Aturan Penyetelan Metode Cohen Coon [3]

Kontrol	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a} \left(1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau} \right)$	-	-
PI	$\frac{0.9}{a} \left(1 + \frac{0.92\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{3.3 - 3.0\tau}{1 + 1.2\tau} L$	-
PD	$\frac{1.24}{a} \left(1 + \frac{0.13\tau}{1-\tau} \right)$	-	$\frac{0.27 - 0.36\tau}{1 - 0.87\tau} L$
PID	$\frac{1.35}{a} \left(1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{2.5 - 2.0\tau}{1 - 0.39\tau} L$	$\frac{2.0 - 3.0\tau}{1 - 0.81\tau}$

III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini perancangan sistem dilakukan menjadi beberapa tahapan seperti gambar 4 yang dilakukan secara beruntun. Tahap pertama adalah identifikasi masalah yang terkait dengan jurnal sekaligus pengambilan data. Tahap kedua adalah perancangan metode DTC (*Direct Torque Control*) yang terdiri komparator, estimator, *setting* referensi kecepatan, sektor sudut *fluks* stator dan *switching table inverter*. Tahap terakhir adalah melakukan pengujian pada motor induksi metode DTC berbasis PID (*Proporsional Integral Diferensial*) dalam kondisi tanpa beban dan berbeban menggunakan 2 metode *tunning* yaitu *ziegler nichols* dan metode *cohen-coon*, selanjutnya hasil simulasi akan di analisis.

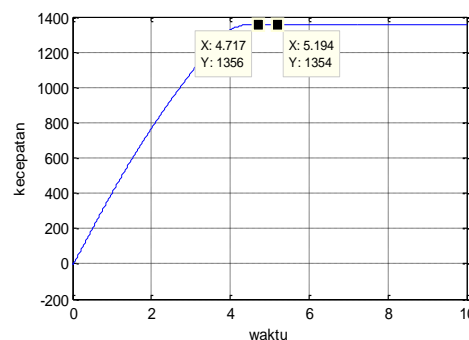


Gambar 6. Konsep diagram alur kerja

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi dan Pengujian Motor Induksi Tanpa Kontroler PID

Simulasi tanpa kontrol bertujuan untuk mengetahui karakteristik dasar dari permodelan motor induksi. Pada simulasi ini diberi masukan tegangan tiga fasa sehingga menghasilkan kecepatan motor dan torsi yang konstan. Sehingga diperoleh hasil seperti pada gambar 7.

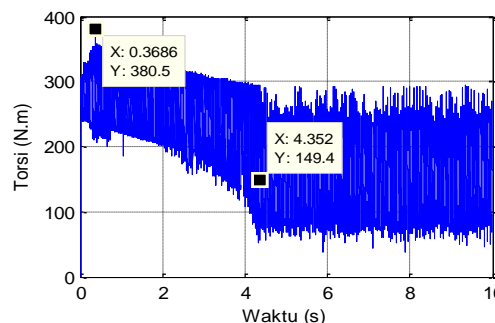


Gambar 7. Hasil simulasi kecepatan motor induksi tanpa menggunakan kendali

Dari simulasi diperoleh beberapa karakteristik dari motor induksi yang berada pada IP Grati sebagai berikut :

Kecepatan nominal	= 1354 rpm.
Waktu mencapai <i>steady state</i>	= 5.1 detik.
<i>Delay time</i> / waktu tunda (t_d)	= 2.5 detik.
<i>Rise time</i> / waktu naik (t_r) (5%-95%)	= 5.3 detik.
<i>Peak time</i> / waktu puncak (t_p)	= 4.7 detik.
Kecepatan <i>starting</i>	= 1356 rpm.

Dari hasil simulasi tanpa kontrol maka dapat disimpulkan kecepatan kurang dari nilai *setpoint* sehingga perlu dilakukan pengujian menggunakan sistem kendali kecepatan dengan metode DTC (*Direct Torque Control*) berbasis controller PID.

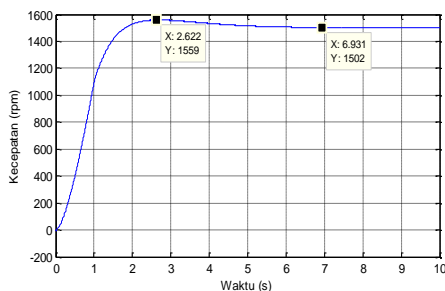


Gambar 6. Hasil simulasi torsi motor induksi tanpa menggunakan kontrol

Pada kondisi normal dengan menggunakan beban maka torsi yang diterima oleh motor sebesar 149.4 Nm, sedangkan kecepatan motor induksi turun 9.8% dari kecepatan normal pada motor. Hal inilah yang menjadi dasar untuk dilakukan kendali kecepatan agar torsi motor terkontrol dengan baik.

B. Hasil Simulasi dan Pengujian DTC (Direct Torque Control) dengan kontroler PID (Proporsional Integral Diferensial) dengan menggunakan metode ziegler nichols.

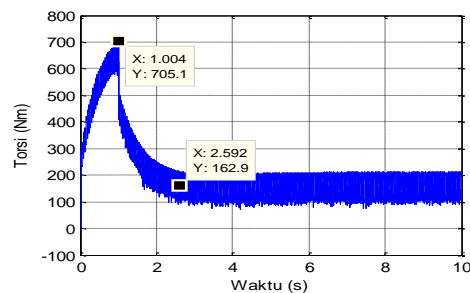
Pada pengujian yang pertama kendali kecepatan menggunakan metode DTC dengan kendali kecepatan PID dengan menggunakan metode ziegler nichols pada plant motor induksi yang telah dirancang. Nilai parameter kontroller PID yaitu $K_p = 1.2$, $K_i = 0.7$ dan $K_d = 0.17$ maka hasil respon simulasi kecepatan dan torsi ditunjukkan pada gambar 7 dan gambar 8.



Gambar 7. Hasil simulasi kecepatan motor induksi menggunakan kontrol PID

Dari simulasi menggunakan kontroller PID diperoleh hasil kecepatan sebagai berikut :

- Kecepatan nominal = 1502 rpm.
- Waktu mencapai steady state = 6.9 detik.
- Delay time / waktu tunda (td) = 0.78 detik.
- Rise time / waktu naik(tr) (5%-95%) = 1.82 detik.
- Peak time / waktu puncak (tp) = 2.6 detik.
- Kecepatan Starting = 1559 rpm.

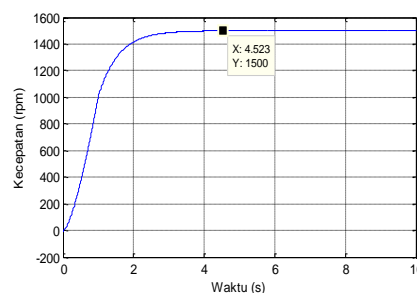


Gambar 8. Hasil simulasi torsi motor induksi menggunakan kontrol PID

Torsi yang dihasilkan sebesar 162.9 Nm. pada kondisi stabil dan pada starting torsi yang dihasilkan oleh motor sebesar 705,1 Nm. pada waktu 1.004 detik.

C. Hasil Simulasi dan Pengujian DTC (Direct Torque Control) dengan Kontroler PID (Proporsional Integral Diferensial) Dengan Menggunakan Metode Cohen Coon.

Pengujian kendali kecepatan menggunakan metode DTC dengan kontroler PID pada plant motor induksi yang telah dirancang. Nilai parameter kontroller PID yaitu $K_p = 1.05$, $K_i = 0.32$ dan $K_d = 0.2$. untuk metode ini digunakan sebagai pembanding dari metode ziegler nichols. Dari simulasi metode cohen coon maka didapat respon simulasi kecepatan dan torsi ditunjukkan pada gambar 9 dan gambar 10.

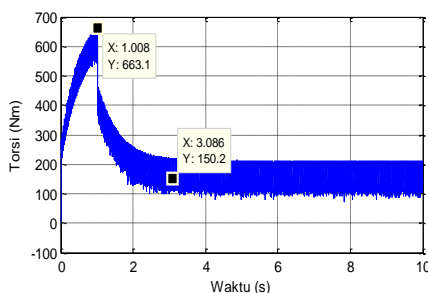


Gambar 9. Hasil simulasi kecepatan motor induksi menggunakan kontrol PID dengan metode cohen-coon

Hasil simulasi menggunakan kontroller *PID* dengan menggunakan metode *cohen coon* maka dapat diperoleh hasil kecepatan sebagai berikut :

- Kecepatan nominal = 1500 rpm.
- Waktu mencapai *steady state* = 4.5 detik.
- Delay time* / waktu tunda (td) = - detik.
- Rise time* / waktu naik (tr) (5%-95%) = 1.01 detik.
- Peak time* / waktu puncak (tp) = - detik.
- Kecepatan *starting* = - rpm.

Pada simulasi menggunakan metode *cohen coon* tidak terdapat *overshoot* kecepatan dan naiknya kecepatan cenderung stabil *setpoint*. Dengan waktu tempuh 4.5 detik lebih responsif daripada metode *ziegler nichlos*.

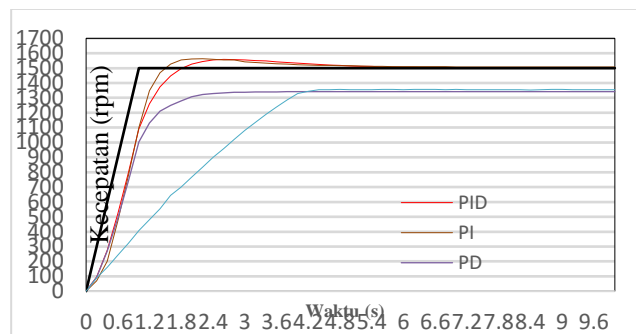


Gambar 10. Hasil simulasi torsi motor induksi menggunakan kontrol *PID* dengan metode *cohen-coon*

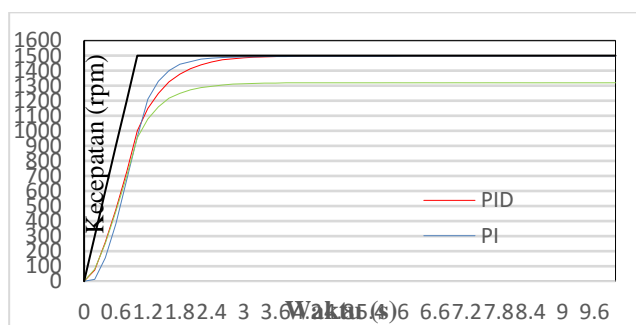
Pada simulasi torsi menggunakan metode *cohen coon* perubahannya tidak terlalu banyak seperti ditunjukkan gambar 10 nilai yang dihasilkan pada kondisi stabil sebesar 150.2 Nm dengan waktu tempuh sebesar 3.08 detik dan pada saat *starting* torsi yang dihasilkan oleh motor sebesar 663.1 Nm pada waktu 1.008 detik.

D. Pembahasan.

Pembahasan dalam sistem ini didapat dengan melakukan hasil simulasi pada *Simulink-Matlab*. Selanjutnya, memasukkan nilai parameter pada blok kontroller *PID* di *simulink*. Berikut ini gambar grafik yang dihasilkan pada proses simulasi :



Gambar 11. Hasil simulasi perbandingan metode *ziegler nichols* dengan tanpa kontrol



Gambar 12. Hasil simulasi perbandingan metode *cohen coon* dengan beban 100%

Tabel 3. Performasi sistem kontrol menggunakan *PID*

METODE	Kecepatan Nominal	Waktu Mencapai <i>Steady State</i>	Kecepatan <i>Starting</i>	<i>Peak Time</i> / Waktu Puncak (tp)	<i>Delay Time</i> / Waktu Tunda (td)	<i>Rise Time</i> / Waktu Naik(tr)
Tanpa Kontrol	1354	5.1	1356	4.7	2.5	5.3
<i>Ziegler - Nichols</i>	1502	6.9	1559	2.6	0.78	1.82
<i>Cohen-Coon</i>	1500	4.5	-	-	-	1.01

Sistem kendali *PID* (*Proporsional Integral Diferensial*) menggunakan metode *ziegler-nichols* pada pembebanan 100% hasil yang diperoleh kecepatan *starting* sebesar 1559 rpm pada waktu 2.6 detik dan motor induksi mencapai kondisi normal pada waktu 6.9 detik dengan kecepatan sebesar 1501 rpm sehingga metode kecepatan motor dalam keadaan normal sesuai dengan *set point* dan *nameplate* motor.

Hasil *tuning* metode *ziegler-nichols* menggunakan kendali *PID* akan dibandingkan dengan kendali *PI* (*Proporsional Integral*) dan *PD* (*Proporsional Diferensial*). Hasilnya pada keadaan menggunakan kendali *PI* kecepatan *starting* sebesar 1564 rpm pada waktu 2.1 detik sedangkan pada kondisi normal kecepatan motor diatas *setpoint* dengan rata-rata kecepatan sebesar 1507 rpm yang terjadi pada waktu 5.5 detik. Sedangkan kendali menggunakan *PD* kecepatan tidak sampai pada *set point* yaitu 1342 rpm dengan waktu tempuh 3.4 detik.

Hasil metode *cohen-coon* dalam sistem kendali *PID* (*Proporsional Integral Diferensial*) pada pembebanan 100% diperoleh kecepatan *starting* tidak terjadi, sehingga kondisi pengontrolan kecepatan langsung mencapai *set point* yaitu 1500 rpm yang di tempuh dengan pada waktu 4,5 detik. Sehingga metode ini dalam pengendalian menggunakan *PID* lebih baik daripada menggunakan metode *ziegler-nichols*.

V. KESIMPULAN

Dari simulasi diperoleh bahwa perancangan kendali kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) berbasis *Proporsional Integral Diferensial* (PID) maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Rancangan kontrol *Proporsional Integral Diferensial* (PID) menghasilkan respon kecepatan referensi mengikuti kecepatan *setpoint* dengan beberapa kondisi pengujian.
2. Pada beberapa kondisi pengujian perubahan kontrol *PID* menjadi *Proporsional Integral* (PI) maupun *Proporsional Diferensial* (PD) dengan menggunakan metode *tuning* yang sama, maka kontrol kecepatan dengan *tuning PI* lebih besar nilainya dari *setpoint*. Sedangkan kontrol dengan *tuning PD* tidak mencapai *setpoint*.
3. Perbandingan *tuning Proporsional Integral Diferensial* (PID) menggunakan metode *ziegler-nichols* terdapat *overshoot* kecepatan

sebesar 0.8% dari *setpoint*, sedangkan *tuning* menggunakan metode *cohen coon* tidak terdapat *overshoot* dan kecepatan yang dikendalikan sesuai dengan *setpoint*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abu, Haitham. Atif Iqbal and Jaroslaw Guzinski (2012). High Performance Control Of AC Drives With Matlab/Simulink Models. Thomson Digital, Nodia: India.
- [2] Alnasir, ZA. & Almarhoon AH. (2012). *Design of Direct Torque Controller of Induction Motor (DTC)*. International Journal of Engineering and Technology (IJET) No : 0975-4024
- [3] Astrom, Karl Johan, (1995). *PID Controller*. Printed in the United States of America. ISBN : 1-55617-516-7
- [4] Buja. G. S and Kazmierkowski. M. P,(2004) "DTC of pwm inverter-fed AC motors - A Survey", IEEE Trans. on Ind. Elec., volume 54, no. 5, , pp. 744 – 757
- [5] Chapman, Stephen J. (2002). *Electric Machinery And Power System Fundamentals*, New York: Mc Graw-Hill.
- [6] Dong ming, Tang Yong-qi dkk. (2013). *Study of an Improve Fuzzy Direct Torque Control Of Induction Motor*. Telkomnika.
- [7] K.Ogata. (2010) *Modern Control Engineering*, Fifth ed. New Jersey, Prentice Hall,.
- [8] Parekh, Rakesh. (2005). *VF Control of 3-Phase Induction Motor Using Space Vector Modulation*. Microchip Technology Inc.
- [9] Rameli. (2007). *Diktat Kuliah Kontrol Electric Drive*. ITS: Surabaya.
- [10] Vahedpour M., Abolfazl R.N. (2015). *Comparison between performance of Conventional, Fuzzy and Fractional Order PID Controller in Practical Speed Control Of Induction Motor*. International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI). Iran.