

PERANCANGAN SIMULASI SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN METODE KONTROL SKALAR

DESIGN OF 3 PHASE INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM SIMULATOR WITH SCALAR CONTROL METHOD

Rian Sumanjaya¹ Dr. Erwin Susanto, ST.,MT², Ig. Prasetya Dwi Wibawa,ST.,MT³
Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
¹riansumanjaya@gmail.com, ²ews@telkomuniversity.ac.id, ³prasdwiwibawa@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik yang banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum digunakan adalah motor induksi 3 fasa dan motor induksi 1 fasa. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan di bidang industri karena harganya relatif murah untuk bidang industri dan mempunyai kehandalan yang tinggi. Namun motor induksi 3 fasa memiliki kelemahan salah satunya adalah motor induksi 3 fasa memiliki beberapa karakteristik parameter yang tidak linier, sehingga tidak dapat mempertahankan kecepatannya secara konstan bila terjadi perubahan beban. Oleh karena itu untuk mendapatkan kecepatan yang konstan dan performansi sistem yang lebih baik terhadap perubahan beban dibutuhkan suatu pengontrol.

Pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan dengan beberapa cara salah satunya adalah kontrol skalar atau biasa disebut juga kontrol tegangan/frekuensi (v/f). Prinsip dari scalar control ini adalah memaksa motor memiliki hubungan yang konstan antara tegangan dan frekuensi. Keuntungan menggunakan kontrol skalar ini adalah memiliki struktur kendali yang sederhana, mudah dan cepat diprogram.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa simulasi sistem kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa dapat bekerja dengan baik. Ketika dilakukan pengujian dengan cara merubah nilai K_p didapatkan hasil putaran rotor memiliki nilai *error steady state* antara 1,013 sampai dengan 1,16.

Kata kunci : Motor Induksi 3 Fasa, Kontrol Skalar, Kontrol PI Motor

ABSTRACT

Induction motors are alternating current electric motors are widely used in everyday life both in industry and in household. Induction motors are commonly used are 3 phase induction motor and 1 phase induction motor. 3 phase induction motors are widely used in industry because they are relatively cheap to industry and has a high reliability. But the 3 phase induction motor has weakness one of which is a 3 phase induction motor has several characteristics parameters are not linear, so it can not maintain a constant speed when the load changes. Therefore, to obtain a constant speed and better system performance to changes in load requires a controller.

Controlling the speed of 3 phase induction motor can be done in several ways, one of them is a scalar control or commonly referred to as the control voltage/frequency (V/f). Principles of scalar control is forcing the motor has a constant relationship between voltage and frequency. The advantage of using scalar control is to have a control structure that is simple, easy and fast in the program.

Based on simulation results that have been done, it can be concluded that the speed control system simulation of 3 phase induction motor can work properly. When the testing is done by changing the value of K_p is obtained the rotation speed of the rotor has a steady state error value between 1,013 to 1,16.

Keywords : 3 Phase Induction Motor, Scalar Control, PI Control

1. Pendahuluan

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik yang banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum digunakan adalah motor induksi 3 fasa dan motor induksi 1 fasa. Motor induksi 3 fasa dioperasikan pada sistem tenaga 3 fasa dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas besar.

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. Namun motor induksi 3 fasa memiliki kelemahan salah satunya yaitu tidak dapat mempertahankan kecepatannya secara konstan bila terjadi perubahan beban. Oleh karena itu untuk mendapatkan kecepatan yang konstan dan performansi sistem yang lebih baik terhadap perubahan beban dibutuhkan suatu pengontrol.

Pengontrol kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan dengan beberapa cara salah satunya adalah kontrol skalar 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. Keuntungan menggunakan kontrol skalar ini adalah memiliki struktur kendali yang sederhana, mudah dan cepat diprogram serta dapat dioperasikan dengan metode kendali loop terbuka tanpa pengendali kecepatan atau dengan pengendali kecepatan, sehingga secara ekonomis lebih murah.

2. Dasar Teori

2.1 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling banyak digunakan. Motor induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting yaitu rotor, stator, dan celah. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh stator. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa.

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3 fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3 fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang akan berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator.

2.2 Kontrol PID

Di dalam suatu sistem kontrol kita mengenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol derivative. 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*, dan aksi kontrol derivative mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error* atau meredam *overshot/undershot*. Untuk itu agar kita dapat menghasilkan output dengan *rise time* yang cepat dan *error* yang kecil kita dapat menggabungkan ketiga aksi kontrol ini menjadi aksi kontrol PID.

2.3 Kontrol Proporsional

Pengontrol proporsional memiliki keluaran yang sebanding atau proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengontrol proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Perubahan sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengeluarkan output sinyal sebesar konstanta pengalinya.

Ciri-ciri pengontrol proporsional harus diperhatikan ketika pengontrol tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, pengguna pengontrol proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini :

1. Jika nilai K_p kecil, pengontrol proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Jika nilai K_p dinaikan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai set point dan keadaan stabil.
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respon sistem akan berosilasi.

2.4 Kontrol Integral

Pengontrol integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan stabil nol. Jika sebuah plant tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), pengontrol proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan stabilnya nol. Dengan pengontrol integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai keadaan stabilnya nol.

Ketika digunakan, pengontrol integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini :

1. Keluaran pengontrol membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya offset. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengontrol.

2.5 Kontrol Derivative

Keluaran pengontrol derivative memiliki sifat seperti halnya suatu operasi diferensial. Perubahan mendadak pada masukan pengontrol akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Karakteristik pengontrol derivative adalah sebagai berikut :

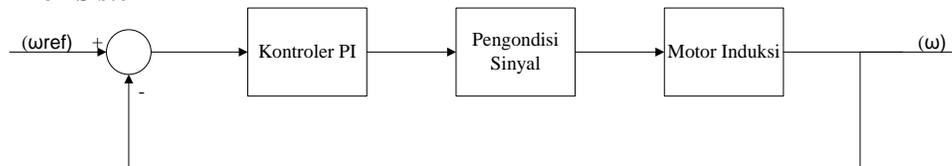
1. Pengontrol ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengontrol tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.

Tabel 1 Kinerja Kontrol PID

Respon Close Loop	Rise Time	Overshoot	Error Steady State
K_p	Berkurang	Meningkat	Berkurang
K_i	Berkurang	Meningkat	Hampir Nol
K_d	Berubah Sedikit	Berkurang	Berubah Sedikit

3. Perancangan Sistem

3.1 Diagram Blok Sistem

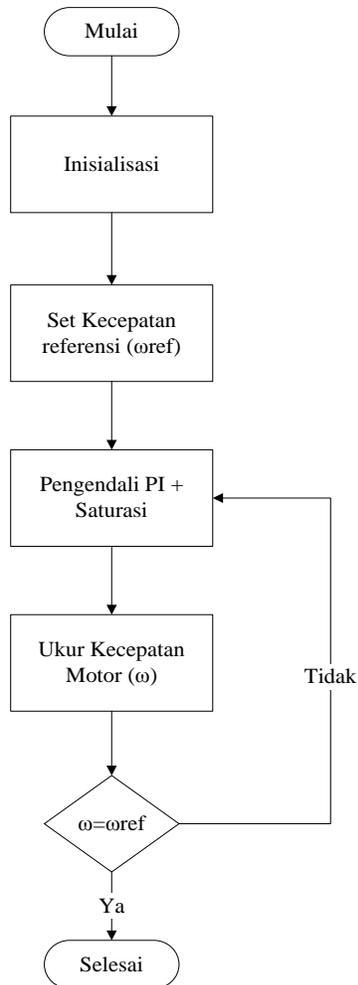


Gambar 1 Diagram Blok Sistem

Berdasarkan gambar 3.1 diatas sinyal masukan berupa kecepatan referensi (ω_{ref}). Kontroler PI akan mengolah nilai masukan kecepatan referensi (ω_{ref}) dan nilai error. Pengondisi sinyal digunakan untuk mempermudah perhitungan parameter dan komponen dari suatu motor induksi yang selanjutnya bisa digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi dan analisis kecepatan motor terhadap pengaruh perubahan beban.

3.2 Diagram Alir Sistem

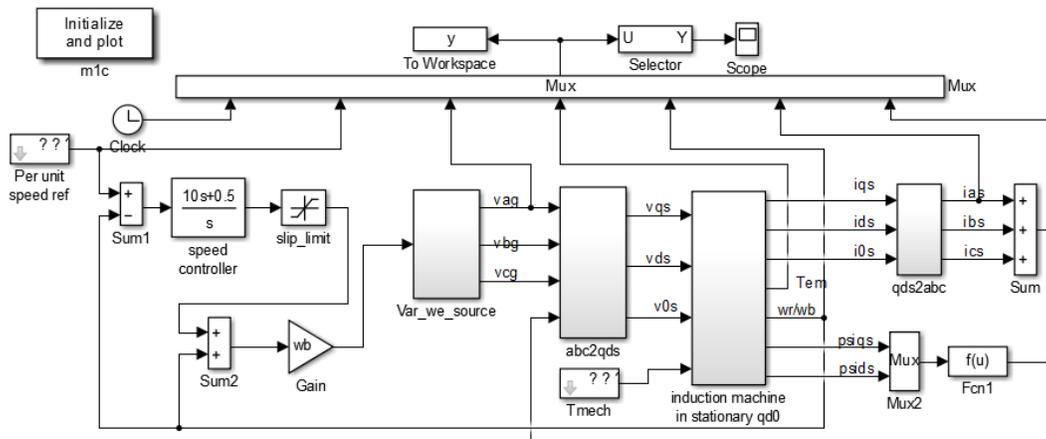
Berikut adalah gambar diagram alir sistem yang telah dirancang pada tugas akhir kali ini



Gambar 2 Diagram Alir Sistem

3.3 Pemodelan Sistem Dalam Matlab

Berikut ini merupakan diagram keseluruhan sistem kontrol kecepatan motor induksi yang dimodelkan menggunakan Matlab.



Gambar 3 Diagram Keseluruhan Sistem Kontrol Kecepatan Motor Induksi

Gambar 3.3 diatas merupakan blok diagram keseluruhan untuk simulasi sistem kontrol kecepatan motor induksi . Simulasi ini mengeluarkan 6 jenis keluaran yang ditampilkan yaitu kecepatan referensi, tegangan fase ke

netral motor, arus motor, torsi elektromekanis motor, kecepatan rotor, dan flux linkage stator. Seluruh keluaran ini dikelola oleh multiplexer 7-1 yang ditambah dengan clocknya. Multiplexer ini dihubungkan ke scope dan workspace. Scope berfungsi untuk melihat keluaran gelombang dan workspace untuk mengeluarkan hasilnya dalam bentuk matriks pada workspace Matlab.

3.3.1 Blok Var_we_source

Blok Var_we_source merupakan blok sumber tegangan. Untuk menjadi 3 fase gelombang, tegangan diatur agar memiliki perbedaan fase sebesar 120° . Kemudian ketiga fase gelombang tersebut a, b dan c masuk ke blok abc2qds untuk mentransformasikan ketiga fase tersebut ke dalam bentuk konfigurasi qd0.

3.3.2 Blok abc2qds

Blok abc2qds merupakan blok yang berfungsi untuk transformasi konfigurasi abc ke qds atau qd0. Ada empat input pada blok ini. Tiga input berasal dari tegangan input motor dan satu input berasal dari penjumlahan arus stator yang didapatkan. Untuk output tegangan akan masuk ke dalam multiplexer 3-1. Tegangan fase a akan menjadi output pertama (u[1]), tegangan fase b akan menjadi keluaran kedua (u[2]), dan tegangan fase c akan menjadi keluaran ketiga (u[3]).

3.3.3 Blok induction machine

Blok induction machine merupakan diagram keseluruhan motor induksi. Blok induction machine terdiri dari blok Qaxis, Daxis, Rotor, dan Zero_seq. Blok induction machine memiliki tiga input yaitu in_vqs, in_vds, dan in_v0s. Ketiga input ini merupakan output dari blok abc2qds.

Blok diagram ini diawali oleh 2 multiplexer 3-1. Multiplexer pertama memiliki 3 input yaitu flux linkage motor (psiqm) yang dilambangkan dengan u[1], tegangan stator pada sisi konfigurasi q yang dilambangkan dengan u[2], tegangan ini merupakan keluaran dari blok transformasi abc2dqs dan flux linkage stator pada sisi konfigurasi (psiqs) yang dilambangkan dengan u[3], psiqs adalah flux linkage pada sisi konfigurasi q.

Sama seperti blok Qaxis, blok Daxis juga diawali oleh 2 multiplexer 3-1. Multiplexer pertama memiliki 3 input yaitu flux linkage motor (psiqm) yang dilambangkan dengan u[1], tegangan stator pada sisi konfigurasi d yang dilambangkan dengan u[2], tegangan ini merupakan keluaran dari blok transformasi abc2dqs dan flux linkage stator pada sisi konfigurasi (psids) yang dilambangkan dengan u[3], psids adalah flux linkage pada sisi konfigurasi d.

Blok rotor merupakan blok diagram yang menggambarkan operasi yang terjadi di rotor. Blok ini juga digunakan untuk mencari nilai torsi yang terjadi pada rotor.

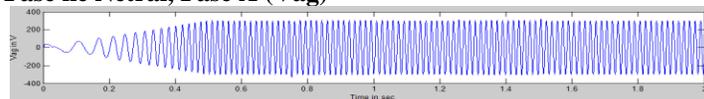
Blok Zero_seq merupakan blok yang menggambarkan blok zero sequence. Blok ini berfungsi untuk mengolah keluaran dari blok abc2qds yang berupa urutan 0.

3.3.4 Blok qds2abc

Blok qds2abc merupakan blok yang berfungsi untuk mentransformasi balik nilai arus stator yang diperoleh dari konfigurasi dq0 kembali menjadi konfigurasi abc.

4. Pengujian dan Analisa

4.1 Simulasi Tegangan Fase ke Netral, Fase A (Vag)



Gambar 4 Hasil Simulasi Tegangan Fase ke Netral, Fase A (Vag)

Pada gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa gelombang tegangan berbentuk sinusoidal. Tegangan yang terukur pada simulasi merupakan tegangan fase ke netral. Nilai tegangan fase ke netral dapat diperoleh dengan menggunakan perhitungan dengan rumusan berikut :

$$V_{L-N} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}$$

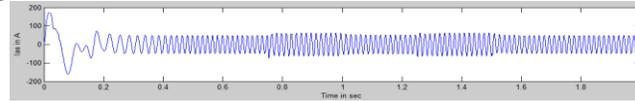
$$V_{pp} = V_i \times \sqrt{2}$$

$$V_o = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2}$$

$$V_o = 163,3 \text{ V}$$

Nilai tegangan yang diberikan di awal merupakan tegangan fase ke fase dengan besar 200V. Nilai tersebut merupakan nilai tegangan nominal (RMS), sehingga untuk mencari nilai RMS tegangan fase ke netral nilai tersebut dibagi dengan akar 3 dan untuk mendapatkan tegangan peak to peaknya nilai tersebut dikalikan dengan akar 2.

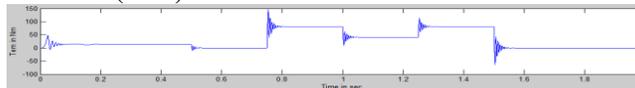
4.2 Simulasi Arus Starting (Ias)



Gambar 5 Hasil Simulasi Arus Starting (Ias)

Pada gambar 4.2 dapat dilihat hasil simulasi arus starting (Ias). Pada saat proses awal terlihat nilai arus sangat besar, namun setelah itu arus bernilai lebih kecil. Nilai arus sangat besar pada proses awal dikarenakan untuk menghasilkan torsi yang besar untuk menggerakkan rotor dari keadaan diam hingga mencapai kondisi steady state dibutuhkan arus yang sangat besar. Sedangkan setelah mencapai kondisi steady state nilai arus yang dibutuhkan menjadi lebih kecil.

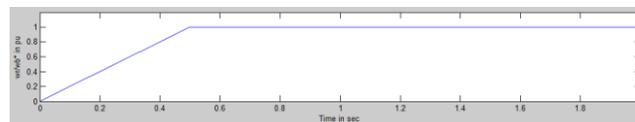
4.3 Simulasi Torsi Elektro Mekanis (Tem)



Gambar 6 Hasil Simulasi Torsi Elektro Mekanis (Tem)

Dari gambar 4.3 di atas dapat dilihat pada saat proses awal nilai torsi elektromekanis terlihat besar, kemudian setelah itu nilai torsi elektromekanis terlihat lebih kecil. Hal ini terjadi karena torsi elektromekanis dibutuhkan untuk menggerakkan rotor motor, sehingga pada proses awal dibutuhkan nilai torsi elektromekanis yang sangat besar untuk menggerakkan rotor dari posisi diam hingga berputar dengan kecepatan stabil. Pada detik ke 0,75 nilai torsi terlihat membesar, hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan beban sehingga mempengaruhi nilai torsi. Pada detik ke 1 sampai 4,5 juga terjadi perubahan beban sehingga mempengaruhi nilai torsi elektro mekanis.

4.4 Simulasi Kecepatan Referensi Putaran Rotor



Gambar 7 Hasil Simulasi Kecepatan Referensi Putaran Rotor

Pada Gambar 4.4 dapat di lihat hasil simulasi kecepatan referensi putaran rotor. Kecepatan referensi merupakan kecepatan putaran rotor yang diinginkan yang telah disetting diawal simulasi. Nilai kecepatan referensi inilah yang akan dibandingkan dengan nilai kecepatan putaran rotor setelah masuk ke dalam sistem kontrol PI.

4.5 Simulasi Kontroler PI

Untuk mengetahui kinerja kontroler PID maka akan dilakukan simulasi dengan mengubah parameter-parameter yang ditentukan yaitu dengan mengubah nilai K_p dan K_i . Dengan mengubah nilai parameter tersebut dapat dianalisa bagaimana pengaruhnya terhadap nilai rise time, overshoot, settling time, dan steady state error.

4.5.1 Tuning Kontroler PI

Sebelum melakukan pengujian pengontrol, dilakukan identifikasi sistem dengan melakukan tuning pada pengontrol agar diperoleh nilai K_p dan T_i . Pada simulasi kali ini digunakan metode tuning Ziegler-Nichols berdasarkan aturan kritikal gain K_{cr} . Pada aturan ini kita menetapkan nilai $T_i = \infty$. Dalam simulasi ini dilakukan penyesuaian sehingga untuk menghasilkan nilai $T_i = \infty$ maka nilai T_i diberi nilai 0.

Setelah dilakukan pengujian dengan merubah nilai K_p mulai dari 0, didapatkan sistem mulai beresilasi pada saat nilai K_p 0,8. Sehingga nilai 0,8 dapat disebut juga nilai kritikal K_{cr} . Sedangkan kritikal periode P_{cr} bernilai 0,024.

Berdasarkan tuning Ziegler-Nichols berdasarkan aturan kritikal gain K_{cr} , bisa diperoleh nilai K_p dan T_i :

$$K_p = 0,45K_{cr}$$

$$K_p = 0,45 \times 0,8$$

$$K_p = 0,36$$

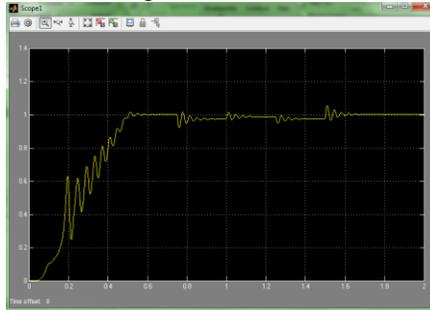
Sedangkan nilai T_i :

$$T_i = \frac{1}{1,2} P_{cr}$$

$$T_i = \frac{1}{1,2} \times 0,024$$

$$T_i = 0,02$$

Berdasarkan hasil perhitungan nilai K_p dan T_i , kemudian kita lakukan simulasi dengan memasukkan nilai K_p 0,36 dan nilai T_i 0,02. Dari hasil simulasi dilihat di gambar 4.5



Gambar 8 Hasil simulasi dengan nilai K_p 0,36 dan T_i 0,02

4.5.2 Simulasi Dengan Merubah Konstanta Proporsional

Pada simulasi ini akan digunakan nilai konstanta integral tetap yaitu 0,5. Sedangkan nilai konstanta proporsional akan diubah-ubah dengan range antara 1 sampai 10. Dari hasil simulasi tersebut akan dilihat pengaruhnya terhadap kecepatan putaran rotor.

Tabel 2 Hasil Simulasi Pengaruh Perubahan Nilai K_p

K_p	Error Steady State
1	1,157
2	1,16
3	1,022
4	1,02
5	1,018
6	1,016
7	1,015
8	1,014
9	1,013
10	1,013

Berdasarkan hasil simulasi dengan melakukan perubahan nilai K_p dengan nilai antara 1 sampai 10, dapat dilihat dengan nilai K_p 9 dan 10 kecepatan putaran rotor lebih konstan dan memiliki nilai error steady state yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan nilai K_p yang lebih kecil. Hal ini sesuai berdasarkan karakteristik pengontrol proporsional dimana respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai set point dan keadaan stabil jika nilai K_p dinaikan.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan tahapan-tahapan perancangan, pengujian, dan analisis simulasi sistem kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk memudahkan perhitungan parameter dan komponen dari suatu motor induksi maka digunakan transformasi dari fase abc ke fase dqo

2. Pada proses awal nilai arus starting sangat besar, hal ini dibutuhkan untuk menghasilkan torsi yang besar untuk memutar rotor dari keadaan diam hingga mencapai kondisi steady state.
3. Kecepatan putaran rotor lebih konstan dan memiliki nilai error yang kecil ketika nilai K_p dinaikan.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diaplikasikan dalam pengembangan dan peningkatan performansi tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan hasil kontrol yang lebih baik dapat digunakan kontrol vector.
2. Untuk selanjutnya dapat dicoba implementasi langsung pada motor induksi 3 fasa untuk melihat langsung pengaruh sistem kontrol kecepatan motor ini.

Daftar Pustaka

- [1] ardhan_jho. 2009. Contoh Aplikasi PID. <http://ardhiyansyah.blogspot.com/2009/03/contoh-aplikasi-pid-pengujian-sistem.html> (diakses Agustus 2015)
- [2] Chapman, Stephen J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill
- [3] Mauludin, M.Subchan, Rony Wijanarko, Nugroho Eko Budiyanto. 2014. *Simulasi Kontrol PID Untuk Mengatur Putaran Motor AC*. Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim.
- [4] Mukti K.,Harrij. *Implementasi Scalar Control Dan Vector Control Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa*. Jurnal, Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang.
- [5] Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering Fifth Edition*. New Jersey: Pearson
- [6] Ong, Chee-Mun. 1998. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*. New Jersey : Prentice Hall PTR
- [7] Susanto, Erwin. 2011. *Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) Untuk Motor DC Menggunakan Personal Komputer*. Jurnal, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Telkom.