

# Perancangan dan Implementasi Kontroler *Sliding Mode* Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Muhammad Ridho Utoro, Josaphat Pramudijanto

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail : ridho.utoro11@mhs.ee.its.ac.id

**Abstrak**—Penggunaan motor induksi pada dunia industri banyak kita temui. Hal ini dikarenakan perawatannya yang relatif murah, akan tetapi pengaturan kecepatannya susah. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu kontroler untuk mengatur kinerja dari suatu motor induksi itu sendiri. Penggunaan PLC (*Programmable Logic Controller*) sebagai kontroler telah dipercaya sebagai pengendali utama di dalam dunia industri karena telah terbukti kehandalan dan fleksibilitasnya. Banyak metode pengaturan kecepatan telah digunakan mulai dari pengontrolan menggunakan kontroler PID sampai dengan penggunaan kontroler *Sliding Mode Control* (SMC).

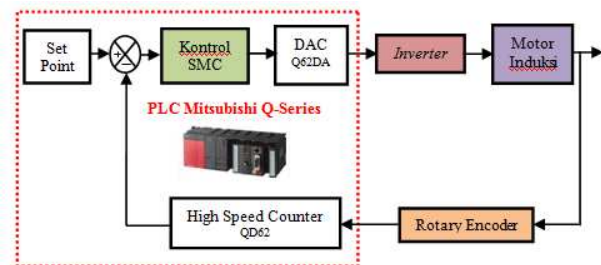
SMC merupakan kendali umpan balik pensaklaran frekuensi tinggi yang memiliki sifat kokoh. Kendali SMC dipilih karena kekokohan yang dimiliki sistem kendali ini diharapkan dapat mengatasi permasalahan perubahan parameter dari motor induksi akibat pembebanan. Perubahan parameter dapat mengakibatkan perubahan respon yang cukup signifikan. Namun kekurangan yang dimiliki oleh kendali SMC adalah timbulnya fenomena *chattering* yang berpengaruh terhadap stabilitas sistem kendali. Dari hasil penelitiann dapat dilihat bahwa SMC memiliki respon keluaran yang baik dalam meredam *chattering*. Sifat kokoh dari kontroler SMC dimana dapat mengembalikan lintasan trayektori ke permukaan luncur dengan cepat sampai 0,2 detik.

**Kata kunci**—Motor Induksi, PLC, *Sliding Mode Control*, Inverter Micromaster 420

## I. PENDAHULUAN

Pada zaman sekarang, teknologi semakin canggih, mulai dari peralatan mekanik, elektrik maupun perangkat lunaknya bersinergi untuk menghasilkan suatu produk ataupun peralatan baru. Motor listrik sebagai penggerak sangat berperan penting dalam dunia industri. Jenis penggerak yang sering dipakai di dunia industri adalah motor induksi tiga fasa. Motor ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan motor jenis yang lain seperti konstruksinya yang sangat sederhana, harga dan perawatan yang relatif murah, tahan terhadap guncangan. Namun motor induksi memiliki kelemahan yaitu tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan kecepatan maupun torsi beban. Maka untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi dibutuhkan suatu kontroler.

Perubahan parameter dari motor menyebabkan perubahan respon yang cukup signifikan. Metode yang umum dilakukan adalah dengan melakukan penalaan parameter kontroler secara kontinyu. Hal ini tentu saja akan sangat merepotkan karena



Gambar 1. Diagram Blok Perancangan Sistem

harus melakukan penalaan parameter kontroler setiap terjadi perubahan beban. Untuk itu diperlukan suatu kontroler yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter[1].

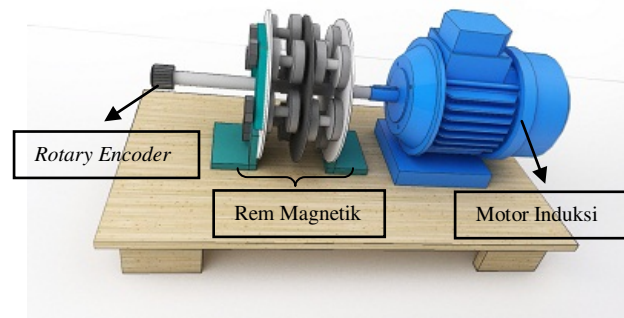
*Sliding mode control* adalah salah satu teknik kendali yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter. Kekurangan dari penggunaan kontroler SMC adalah adanya fenomena *chattering* yang dapat mengganggu stabilitas dari sistem kendali. *Sliding Mode Control* diharapkan dapat membuat mesin induksi memiliki kecepatan motor stabil sesuai referensi. Skema kontrolnya adalah dengan memaksa *vector error* dan *delta error* (*trayektori*) menuju kearah permukaan luncur. Namun, penggunaan kontroler ini akan mengakibatkan terjadinya *chattering* yang kurang baik untuk respon sistem sehingga keberadaannya perlu direduksi.

## II. PERANCANGAN SISTEM

Proses perancangan sistem pada penelitian ini sesuai dengan diagram blok Gambar 1. *Set point* diatur pada *Human Interface Machine* (HMI) yang telah dirancang sebelumnya, dikomunikasikan dengan *Programmable Logic Controller* (PLC) sebagai kontrolernya dengan menggunakan metode kontrol berupa *Sliding Mode Control* (SMC). Sensor yang digunakan berupa *rotary encoder* dan aktuator berupa motor induksi. Pada perancangan *hardware* dilakukan pengujian rangkaian *non inverting*, karena dalam prosesnya tegangan keluaran PLC sebesar 0-5V sedangkan tegangan masukan yang dibutuhkan *inverter* 0-10V, maka dari itu dibutuhkan penguatan sebesar 2 kali. *Inverter* digunakan sebagai *driver* untuk menggerakkan motor induksi.

### A. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi adalah suatu mesin listrik yang merubah energi listrik menjadi energi gerak dengan menggunakan gandingan medan listrik dan mempunyai *slip* antara medan stator dan medan rotor. Stator adalah bagian dari mesin yang tidak berputar dan terletak pada bagian luar. Stator terbuat dari besi bundar berlaminasi dan mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan kumparan. rotor sangkar adalah bagian dari mesin yang berputar bebas dan letaknya bagian dalam dan terbuat dari besi laminasi yang mempunyai slot dengan batang aluminium atau tembaga yang dihubungkan singkat pada ujungnya. Rotor kumparan (*wound rotor*), Kumparan dihubungkan bintang dibagian dalam dan ujung yang lain dihubungkan dengan *slipring* ke tahanan luar. Kumparan dapat dikembangkan menjadi pengaturan kecepatan putaran motor. Pada kerja normal *slipring* hubung singkat secara otomatis, sehingga rotor bekerja seperti rotor sangkar. Rancangan fisik *hardware* bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.,Bentuk Fisik Perancangan Sistem



Gambar 3. PLC Mitsubishi Q – Series

### B. PLC Mitsubishi Q-Series

*Programmable Logic Controller* (PLC) merupakan seperangkat komputer elektronik yang mudah digunakan dan memiliki fungsi kendali untuk berbagai tipe dan tingkat kesulitan yang beraneka ragam.

PLC ini dirancang untuk menggantikan suatu rangkaian *relay sekuensial* dalam suatu sistem kontrol. Selain dapat diprogram, alat ini juga dapat dikendalikan, dan dioperasikan oleh orang yang tidak memiliki pengetahuan dibidang pengoperasian komputer secara khusus. PLC ini memiliki bahasa pemrograman yang mudah dipahami dan dapat dioperasikan bila program yang telah dibuat dengan menggunakan *software* yang sesuai dengan jenis PLC yang digunakan sudah dimasukkan. Alat ini bekerja berdasarkan *input* yang ada dan tergantung dari keadaan pada suatu waktu tertentu yang kemudian akan mengaktifkan atau mematikan *keluaran*. 1 menunjukkan bahwa keadaan yang diharapkan terpenuhi sedangkan 0 berarti keadaan yang diharapkan tidak terpenuhi. Dalam penelitian ini digunakan PLC Mitsubishi Q-Series, merupakan jenis PLC *modular* karena bentuk PLC *modular* terdiri dari modul CPU dan modul I/O (merupakan bagian yang terpisah-pisah). Modul-modul pada PLC ini ditempatkan pada suatu perangkat mirip *board PC* yang dinamakan *backplane*. Modul-modul itu antara lain :

1. Analog Input
2. Analog Output
3. Digital Input
4. Digital Output
5. High speed counter dan modul lain yang dapat ditambahkan pada *backplane*.

### C. Rem Elektromagnetik [3]

Rem adalah suatu alat yang digunakan untuk melakukan aksi deselerasi yang akan menurunkan kecepatan dalam selang waktu yang ditentukan. Tipe rem yang umum digunakan adalah rem yang menggunakan gaya gesek untuk memberikan gaya lawan terhadap gaya gerak. Namun pada sistem pengereman elektromagnetik menggunakan gaya



Gambar 4. Fisik Rem Elektromagnetik

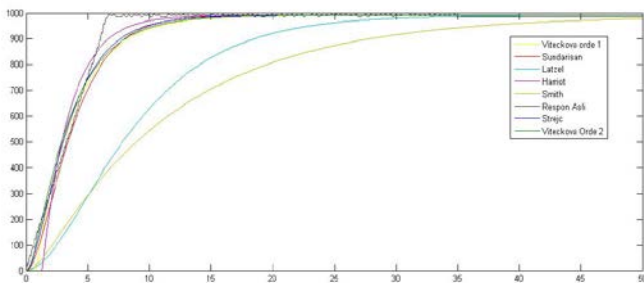
elektromagnetik untuk memperlambat suatu gerakan, yang umumnya adalah gerakan poros. Sebuah piringan dengan bahan logam non-feromagnetik terpasang dengan poros yang berputar. Piringan tersebut diapit oleh sisi stator berupa sistem lilitan elektromagnetik yang dapat membangkitkan medan magnet dari aliran listrik. Arus listrik menimbulkan medan magnet pada lilitan dan logam piringan yang memotong medan magnet tersebut akan menimbulkan arus eddy pada piringan itu sendiri. Arus eddy ini akan menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet sebelumnya, sehingga menghambat gerakan putar dari poros tersebut. Rem elektromagnetik akan optimal untuk memberikan penurunan kecepatan, bukan untuk menghentikan gerak suatu objek. Sehingga Rem ini sering diaplikasikan untuk sistem pengereman pada *roller coaster*, kereta api dan juga digunakan pada alat *dinamometer* untuk pengukuran torsi suatu mesin. Bentuk fisik dari rem elektromagnetik ditunjukkan oleh Gambar 4. Arus eddy yang melingkar menyebabkan medan magnet induksi melawan arah medan magnet mula-mula. Hal ini menyebabkan gaya pengereman yang melawan arah kecepatan konduktor yang bergerak memotong medan magnet dari kedua solenoid.

### D. Identifikasi Sistem

Dalam perancangan identifikasi sistem pada penelitian ini,

Tabel 1.  
Perbandingan Metode Pendekatan Model

No	Metode	Model Matematika	ISE
1	Vitekova Orde 1	$\frac{0,991366548}{3,1407s + 1} e^{-0,8341954s}$	66,583
2	Vitekova Orde 2	$\frac{0,991366548}{4,0121s^2 + 4,0060s + 1}$	57,170
3	Latzel	$\frac{0,991366548}{21,4403s^2 + 9,2607s + 1}$	2,024,155
4	Sundaresan & Krishnaswamy	$\frac{0,991366548}{2,2594s + 1} e^{-0,1311198s}$	56,824
5	Smith	$\frac{0,991366548}{11,56s^2 + 12,24s + 1}$	2,897,477
6	Harriot	$\frac{0,991366548}{2,7641s^2 + 3,7028s + 1}$	39,301
7	Strejc	$\frac{0,991366548}{2,0442s^2 + 3,7243s + 1}$	51,899



Gambar 5. Respon Identifikasi Pendekatan Model dengan Berbagai Metode

sistem terlebih dahulu diidentifikasi secara *open loop* dengan memberikan sinyal uji *step* dan melihat respon berupa kecepatan putar, kemudian hasil dari respon *plant* yang terbaca oleh *rotary encoder* ditampilkan pada computer melalui proses akuisisi data dengan PLC Mitsubishi. Setelah itu salah satu sampel data diterapkan pada 6 model berdasarkan paper penelitian internasional yang telah ditulis oleh Ing Pavel Jakoubek [5]. Setelah itu dilakukan metode validasi *Integral Square Error (ISE)* agar diperoleh model sistem yang paling mendekati respon dengan melihat nilai ISE yang paling kecil pada *software* Matlab R2012a.

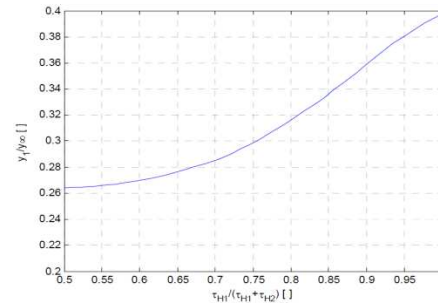
Gambar 5 menunjukkan respon identifikasi system dimana didapatkan metode harriot sebagai acuan dalam proses identifikasi sitem yang akan dilakukan, hal ini dikarenakan metode harriot mempunyai nilai *Integral Square Error (ISE)* yang paling kecil.

**E. Metode Identifikasi Harriott**

Melalui metode *Harriott* suatu sistem didekati dengan model matematika seperti ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$G_H(s) = \frac{K}{(\tau_{H1}s + 1) + (\tau_{H2}s + 1)} e^{-T_{dH}s} \tag{1}$$

1. Tentukan nilai  $t_{73}$  yaitu saat respon bernilai 73 % dari  $y_{ss}$ .
2. Hitung nilai  $T_{dH}$ ,  $\tau_{H1} + \tau_{H2}$ , dan  $t_i$  melalui persamaan :



Gambar 5. Kurva Harriot

$$T_{dH} = 1,937t_{33} - 0,937t_{70} \tag{2}$$

$$(\tau_{H1} + \tau_{H2}) = \frac{t_{73}}{1.3} \tag{3}$$

$$\tau_i = \frac{\tau_{H1} + \tau_{H2}}{2} \tag{4}$$

3. Tentukan nilai  $y_i$  yaitu nilai respon saat  $t_i$
4. Setelah itu hitung nilai  $y_i / y_{ss}$  untuk mendapatkan nilai

$\frac{\tau_{H1}}{\tau_{H1} + \tau_{H2}}$  melalui grafik pada Gambar 5

5. Dengan mensubstitusi nilai  $\frac{\tau_{H1}}{\tau_{H1} + \tau_{H2}}$  pada persamaan

$$(\tau_{H1} + \tau_{H2}) = \frac{t_{73}}{1.3} \text{ maka didapat nilai } \tau_{H1} \text{ dan } \tau_{H2}$$

Sebelum melakukan pemodelan sistem, perlu dilakukan perbandingan antara 6 metode identifikasi yang telah ada. Setelah didapat fungsi penghantar dari masing-masing metode tersebut, langkah selanjutnya adalah menentukan metode terbaik melalui metode validasi *Integral Square Error (ISE)* [5]. Karena nilai ISE terkecil didapat pada metode *harriot*, maka disimpulkan bahwa identifikasi *harriot* akan dipakai sebagai cara untuk mengetahui model matematika dari penelitian ini, yaitu untuk data pada saat beban minimal, nominal, dan maximal.

Kondisi *plant* saat berbeban yaitu saat motor induksi diberi beban berupa pengereman magnetik. Ketika kumparan lilitan diberi tegangan listrik dari autotransformator maka akan terjadi gaya gerak listrik yang menimbulkan pembebanan oleh motor induksi. Jadi perlu pertimbangan dalam memilih kondisi beban minimal, nominal dan maksimal agar sesuai dengan kemampuan motor induksi dalam menerima kondisi saat diberi beban.

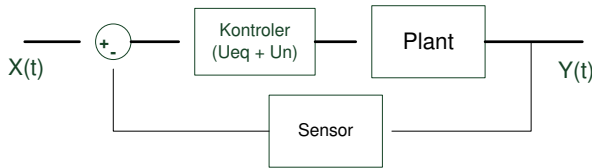
Pada penelitian ini cara membedakan antara beban minimal, nominal dan maksimal adalah berdasarkan kemampuan motor induksi dalam menerima kondisi berbeban maka dipilih :

- Beban minimal : Tanpa beban
- Beban nominal : Tegangan 100 Volt
- Beban maksimal : Tegangan 200 Volt

Didapat fungsi penghantar dari masing-masing kondisi beban seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.  
Model Plant dan nilai RMSE

Beban	Persamaan Model Plant	ISE
Minimal	$G(s) = \frac{0,994656}{3,2205175s^2 + 3,762462s + 1}$	20,8
Nominal	$G(s) = \frac{0,991367}{2,764152s^2 + 3,702846s + 1}$	20,7
Maksimal	$G(s) = \frac{0,974611}{3,638083s^2 + 3,864538s + 1}$	23,0



Gambar 6. Diagram Blok Kontroler

F. Desain Kontroler

Pada hasil identifikasi dengan metode *harriott*, didapat fungsi penghantar sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{0,991367}{2,764152s^2 + 3,702846s + 1} \tag{5}$$

Dari Persamaan (5) yang merupakan model plant dari beban nominal, akan didesain kontroler *sliding mode* untuk mengendalikan model tersebut. Dalam Implementasinya controller ini akan menjalankan fungsi driver dari *inverter* untuk memperbaiki respon kecepatan motor induksi. Struktur kontroler ini akan didesain seperti Gambar 6.

Koefisien numerator dan denominator fungsi penghantar persamaan (6), akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain kontroler. Sehingga fungsi penghantar plant akan menjadi :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{as^2 + bs + 1} \tag{6}$$

dimana :

$$\begin{aligned} K &= 0,991367 \\ a &= 2,764152 \\ b &= 3,702846 \\ c &= 1 \end{aligned}$$

Transfer function tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial (dengan asumsi nilai awal adalah nol) :

$$\begin{aligned} a\ddot{y} + b\dot{y} + c &= Ku \\ \ddot{y} &= -\frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y + \frac{K}{a}u \end{aligned} \tag{7}$$

Lalu, ambil sinyal error sebagai variabel state :

$$x_1 = e \tag{8}$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{e} \tag{9}$$

Persamaan untuk sinyal error adalah :

$$e = r - y \tag{10}$$

Sehingga

$$x_1 = e = r - y \rightarrow y = r - x_1 \tag{11}$$

Karena sistem bersifat regulator maka didapat :

$$\dot{x}_1 = x_2 = \dot{r} - \dot{y} \rightarrow \dot{y} = \dot{x}_1 \tag{12}$$

$$\ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = \ddot{r} - \ddot{y} \rightarrow \ddot{y} = \ddot{x}_1 \tag{13}$$

Substitusikan Persamaan (11) dan (12) pada Persamaan (7), sehingga :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{b}{a}x_1 - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}u \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}u \end{aligned} \tag{15}$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur :

$$\begin{aligned} \sigma_s : \alpha e + \dot{e} &= 0 \\ \sigma_s : \alpha x_1 + x_2 &= 0 \end{aligned} \tag{16}$$

dimana  $\alpha > 0$

Maka dapat dicari sinyal kontrol ekuivalen :

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_s &= 0 \\ \alpha \dot{x}_1 + \dot{x}_2 &= 0 \\ \alpha x_2 + \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}\dot{u}_{eq}\right) &= 0 \\ -\frac{c}{a}(r - x_1) + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2 - \frac{K}{a}\dot{u}_{eq} &= 0 \\ \frac{K}{a}\dot{u}_{eq} &= -\frac{c}{a}(r - x_1) + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2 \\ \dot{u}_{eq} &= \frac{-cx_1 + (\alpha a - b)x_2}{K} \end{aligned} \tag{17}$$

Setelah ditemukan sinyal kontrol ekuivalen, akan dicari sinyal kontrol natural :

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \alpha x_2 + \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}\dot{u}\right) \\ \dot{\sigma} &= \alpha x_2 + \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}(r - x_1) - \frac{K}{a}(\dot{u}_{eq} + \dot{u}_n)\right) \\ \dot{\sigma} &= -\frac{K}{a}\dot{u}_n \end{aligned} \tag{18}$$

Berdasarkan syarat kestabilan Liapunov pada Persamaan (18), maka dipilih :

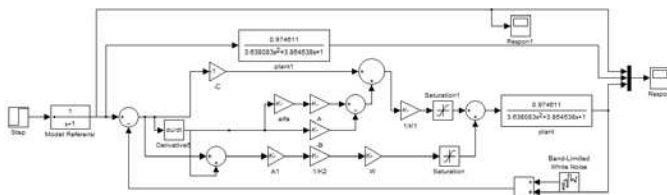
$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= -\frac{K}{a}\dot{u}_n \\ \dot{\sigma} &= -W \cdot \text{sat}(\sigma) \\ -\frac{K}{a}\dot{u}_n &= -W \cdot \text{sat}(\sigma) \\ \dot{u}_n &= \frac{a}{K}W \cdot \text{sat}(\sigma) \end{aligned} \tag{19}$$

mana  $W > 0$

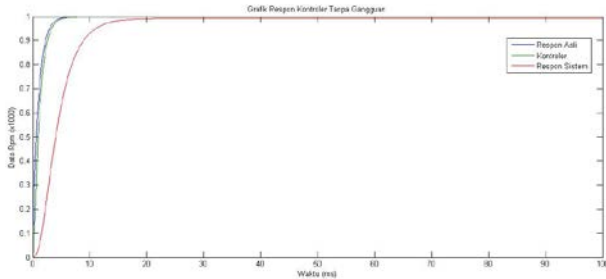
Persamaan (18) dan (19) merupakan persamaan diferensial untuk sinyal kontrol ekuivalen dan natural yang nantinya akan didesain pada diagram blok program kontroler dengan menggunakan MATLAB. Sinyal kontrol total merupakan hasil penjumlahan dari sinyal kontrol ekuivalen dan sinyal kontrol atural[4].

III. IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA

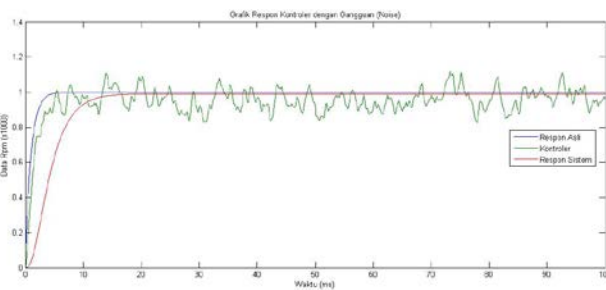
Pemodelan dilakukan dengan metode *harriot* seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Untuk simulasi kontroler.



Gambar 7. Diagram Blok Simulasi Kontroler



Gambar 8. Hasil Simulasi Respon Model Tanpa Gangguan



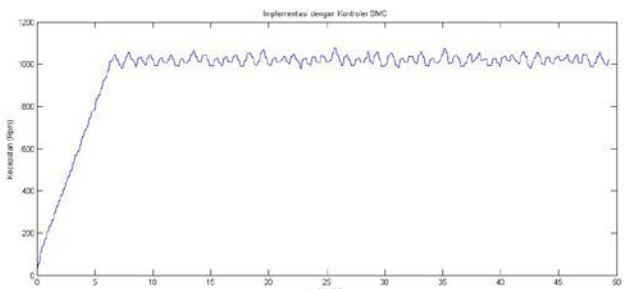
Gambar 9. Hasil Simulasi Respon Model dengan Gangguan

digunakan *software* MATLAB. Gambar 7 menunjukkan diagram blok simulasi kontroler dengan menggunakan metode *Sliding Mode*.

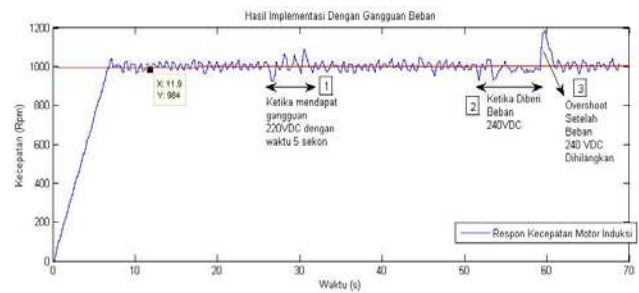
Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara respon asli dengan respon hasil pemodelan metode *harriot* pada keadaan beban minimal dengan menggunakan *software* MATLAB. Terlihat bahwa respon pemodelan dengan menggunakan *sliding mode control* berimpit dengan respon asli. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa perbedaan yang paling kelihatan adalah waktu mencapai nilai *steady state* ( $t_r$ ). waktu untuk mencapai *steady state* pada respon asli sebesar 18 detik sedangkan saat diberi kontroler SMC, respon mendekati nilai *setpoint* yang diberikan.

Gambar 9 menunjukkan hasil pemodelan ketika mendapat gangguan berupa *white noise* dengan gangguan sebesar 0,01 per detik. Terlihat bahwa kontroler bekerja dengan baik mendekati *setpoint* yang diberikan sebesar 1000 rpm. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa perbedaan yang paling kelihatan adalah waktu mencapai nilai *steady state* ( $t_r$ ).

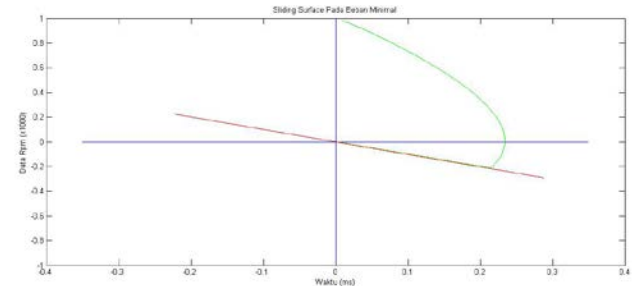
Gambar 10 menunjukkan hasil implementasi tanpa kontroler. Dari spesifikasi tersebut dapat dilihat bahwa  $\tau$  pada beban nominal bernilai seperti spesifikasi yang diinginkan, namun berbeda dengan nilai  $\tau$  yang lebih kecil pada beban minimal dan  $\tau$  yang lebih besar pada beban maksimal. Ini disebabkan karena model *plant* nominal yang digunakan dalam perhitungan desain kontroler.



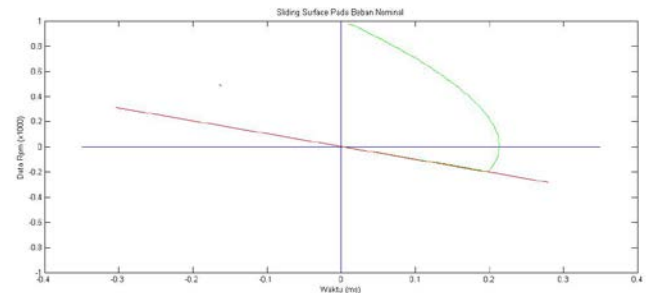
Gambar 10. Hasil Implementasi Tanpa Kontroler Sliding Mode



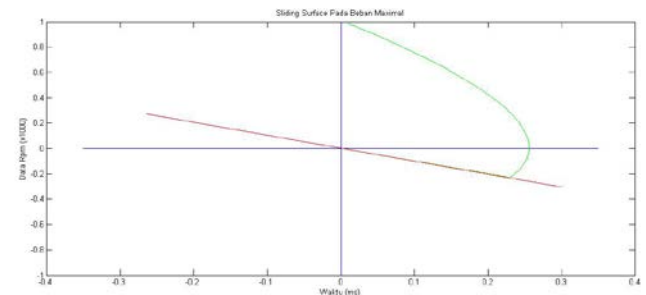
Gambar 11. Hasil Implementasi Dengan Kontroler Sliding Mode



Gambar 12. Sliding Surface Pada Beban Minimal



Gambar 13. Sliding Surface Pada Beban Nominal



Gambar 14. Sliding Surface Pada Beban Maximal

Gambar 11 menunjukkan hasil implementasi kontroler menggunakan *sliding mode control*. Kontroler SMC ini didesain agar  $\tau$  bernilai sama seperti saat beban nominal. Parameter yang digunakan pada desain kontroler ini beban

nominal. Gambar 11 menunjukkan sinyal kontrol yang berhasil memaksa *trayektori* lebih cepat mencapai menuju *sliding surface* untuk nantinya dibawa menuju titik *origin*.

Proses pemeliharaan *trayektori* akan mengakibatkan terjadinya osilasi pada *sliding surface* yang sering disebut dengan *chattering*. *Chattering* ini berdampak pada stabilitas sistem kontrol yang didapat berdasarkan perancangan kontroler. Maka dari itu, analisis ini diperlukan dalam berbagai kondisi, dimana saat mendapat beban minimal, beban nominal dan beban maksimal.

Gambar 12 merupakan kondisi saat beban minimal, tampak bahwa lintasan *trayektori* berjalan tepat saat  $t=0,2s$  untuk kembali ke permukaan luncur yang diinginkan. Gambar 13 merupakan kondisi saat beban nominal, tampak pada gambar bahwa lintasan *trayektori* memaksa kembali pada permukaan luncur saat  $t < 0,2s$ . Gambar 14 merupakan kondisi saat beban maksimal, terlihat lintasan *trayektori* yang ada akan mengembalikan lintasan ke permukaan luncur saat  $t > 0,2s$ .

#### IV. KESIMPULAN

Dalam pengerjaan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kontroler *Sliding Mode* ini dapat mempercepat *rise time* dan juga memperkecil *overshoot* pada saat dilakukan simulasi. Pada simulasi kontroler beban minimal dan nominal didapatkan respon dengan spesifikasi yang diinginkan, namun tidak terjadi pada hasil kontroler beban maksimal yang memiliki nilai  $\tau$  berbeda. Saat implementasi ketika mendapat gangguan dari *auto transformator* sampai dengan 240 Volt akan mengakibatkan *overshoot* pada sistem karena kontroler masih berusaha menstabilkan kondisi sesuai *setpoint*. Secara keseluruhan berdasarkan penelitian, kontrol SMC sangat baik digunakan karena dapat lebih cepat memaksa *trayektori* menuju *sliding surface* untuk nantinya dibawa menuju titik *origin* sampai 0,2 detik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Horath Larray, "*Computer Numerical Control*", Macmillan Publishing Company, New York, 1993.
- [2] Vadim Utkin, "*Sliding Mode Control*", Taylor & Francis, Perancis, 1999.
- [3] Bunte T., Odhental D., Guvenc Aksun B., Guvenc L. "Robust Vehicle Steering Control Design Based On The Disturbance Observer", *Annual Review in Control* 26, pp. 139-149, 2002.
- [4] Okky Sugianto Harapan, "Perancangan dan Implementasi Kontroler Sliding Mode untuk Pengaturan Level pada Couple Tanks", *Tugas Akhir JTE ITS*, Surabaya, Juni, 2010.
- [5] Jakoubek Pavel, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference Studentske tvurci cinnosti*, 2009.