



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE091399

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR DC SHUNT
MENGUNAKAN METODE SLIDING MODE CONTROL**

Oka Gunanta Ginting
NRP 2206 100 196

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendi AK.,MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



TUGAS AKHIR - TE 091399

***DC SHUNT MOTOR SPEED CONTROL USING SLIDING
MODE CONTROL METHOD***

Oka G Ginting
NRP 2206 100 196

Advisor
Ir. Rusdhianto Effendi AK.,MT.
NIP 195704241985021001

ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

Pengendalian Kecepatan Motor DC *Shunt* Menggunakan Metode *Sliding Mode Control*

Oka G Ginting
2206 100 196

Dosen Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRAK

Dalam pengoperasiannya, kecepatan motor DC dipengaruhi adanya gangguan, seperti perubahan beban. Hal ini dapat mengakibatkan kecepatan motor DC yang tidak konstan. Untuk mempertahankan kecepatan motor DC tetap konstan diperlukan suatu metode kontrol. Salah satu metode kontrol yang dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC adalah *sliding mode control* (SMC).

Pada intinya kendali SMC bertujuan untuk meluncurkan (*sliding*) trajektori status dari keadaan awal menuju permukaan luncur. Setelah trajektori status mengenai permukaan luncur, trajektori status akan dipertahankan agar tetap berada pada permukaan luncur.

Tahapan yang dilakukan dengan metode SMC ini adalah mengetahui model matematis dari sistem yang dikontrol. Setelah model matematisnya diketahui, kemudian membuat *state space* untuk selanjutnya mendapatkan kontrol ekuivalen (u_{eq}) dan kontrol natural (u_n). Langkah berikutnya menentukan permukaan luncur. Nilai *error* sistem akan diluncurkan dari nilai awal menuju permukaan luncur (nilai *error* adalah nol). Pada keadaan ini nilai kecepatan konstan dan tidak peka terhadap gangguan.

Kata kunci : motor DC, *sliding mode control*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DC Shunt Motor Speed Control Using Sliding Mode Control Method

Oka G Ginting
2206 100 196

Advisor : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRACT

In it's operation, speed of DC motor sometimes has disturbance, like adding load. This can cause speed of DC motor unstable. To stabilisize speed of DC motor a control method is needed. One of control method that can be used to control speed of DC motor is sliding mode control (SMC).

SMC objective is to slide trajectory status from initial state to sliding surface. When trajectory status hit sliding surface, it will be keep there until next time.

Step by step of SMC is knowing system mathematic model that will be controlled. This mathematic model is used to make state space system and then to used to found equivalent control (u_{eq}) and natural control (u_n). Next step is define sliding surface. Error value of system will sliding from initial state to sliding surface (error value is zero). In this condition speed value of DC motor is constant and isn't sensitive with disturbances.

Keyword : DC motor, sliding mode control

Halaman ini sengaja dikosongkan

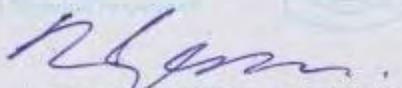
**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR DC SHUNT
MENGUNAKAN METODE SLIDING MODE CONTROL**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing


Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.
NIP. 195704241985021001



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan YME atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul :

PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR DC *SHUNT* MENGUNAKAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK.,MT., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK.,MT. selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Teman-teman e-46 dan seluruh mahasiswa ITS tempat bersosialisasi dan menempa diri penulis selama menempuh kuliah.
6. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak mungkin disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juni 2014

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
1.6 Metodologi	2
1.7 Relevansi	3
BAB II DASAR TEORI	
2.1 Pendahuluan	5
2.2 Sistem Kontrol.....	6
2.2.1 Sistem Kontrol <i>Robust</i>	9
2.2.2 Kontroler <i>On-Off</i>	10
2.3 Motor DC <i>Shunt</i>	12
2.4 Prinsip Kerja Motor Arus Searah	15
2.4.1 Model Matematis	17
2.4.2 Jenis-Jenis Pengaturan Kecepatan Motor DC	18
BAB III PERANCANGAN SISTEM	
3.1 Diagram Blok	25
3.2 Perancangan Motor DC	26
3.2.1 Diagram Blok	26

	3.3 Perancangan <i>Sliding Mode</i>	
	<i>Control</i> (SMC)	29
	3.3.1 Permukaan Luncur	29
	3.3.2 Perancangan Sinyal Kendali	29
BAB IV	SIMULASI dan ANALISA	39
	4.1 Motor DC <i>Shunt</i> Berbeban	39
	4.2 Motor DC <i>Shunt</i> Berbeban dengan SMC	41
BAB V	KESIMPULAN	45
	DAFTAR PUSTAKA	47
	RIWAYAT HIDUP PENULIS	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Motor DC <i>Shunt</i> Berbeban	28
--	----

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Blok Sistem Kontrol	7
Gambar 2.2	Sistem Kontrol Loop Terbuka	8
Gambar 2.3	Sistem Kontrol Loop Tertutup	8
Gambar 2.4	Kontroler <i>On-Off</i>	11
Gambar 2.5	Kontroler <i>On-Off</i> dengan Histeris	11
Gambar 2.6	Respon Sinyal Kontroler <i>On-Off</i>	12
Gambar 2.7	Motor DC <i>Shunt</i> Berbeban	13
Gambar 2.8	Pengaruh Penempatan Konduktor Berarus dalam Medan Magnet.....	16
Gambar 2.9	Pengaturan Medan pada Motor DC Penguatan <i>Shunt</i>	20
Gambar 2.10	Pengaturan Tegangan pada Motor DC Penguatan <i>Shunt</i>	21
Gambar 2.11	Pengaturan Tahanan Jangkar pada Motor DC Penguatan <i>Shunt</i>	22
Gambar 2.12	Diagram Fasa Trayektori Status.....	25
Gambar 3.1	Blok Diagram Simulasi Motor DC.....	27
Gambar 4.1	Simulink Motor DC <i>Shunt</i> Berbeban	39
Gambar 4.2	Respon Kecepatan.....	39
Gambar 4.3	Simulink Motor DC dengan Kontroler SMC.....	40
Gambar 4.4	Respon Kecepatan Setelah Diberi Kontroler	41
Gambar 4.5	Respon Kecepatan dengan Permukaan Luncur	39
Gambar 4.6	Perubahan Nilai <i>Error</i> dengan Permukaan Luncur pada Sb XY.....	42
Gambar 4.7	Perubahan Nilai <i>Error</i> dengan Permukaan Luncur pada Sb XYZ	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dunia industri sekarang ini kebutuhan akan sumber DC semakin meningkat, diantaranya untuk mensuplai beban DC seperti motor yang banyak digunakan pada pabrik-pabrik dan alat transportasi. Motor DC mempunyai keunggulan dalam kehalusan perubahan kecepatan, kemudahan pengendalian, dan tanggapan dinamis yang cepat terhadap perubahan torsi beban. Ada beberapa metode yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC, salah satunya adalah *sliding mode control* (SMC). SMC merupakan pengendali umpan balik penskalaran frekuensi tinggi yang dapat digunakan untuk mengendalikan sistem *linier* maupun *nonlinier*.

Pada intinya kendali dengan SMC bertujuan untuk membatasi gerak trajektori status agar tetap berada pada kondisi yang diinginkan. Suatu trajektori status dibawa meluncur (*sliding*) dari kondisi awal menuju ke permukaan luncur dan dipertahankan tetap berada pada kondisi tersebut. Pada SMC dikenal istilah *hitting time* dan *chattering*. *Hitting time* adalah waktu yang diperlukan trajektori status untuk menuju ke permukaan luncur. *Chattering* adalah fenomena osilasi yang terjadi akibat upaya mempertahankan trajektori status pada permukaan luncur.

Suatu kendali SMC yang baik harus memiliki waktu *hitting time* yang sangat kecil dan fenomena *chattering* yang teredam.

1.2 Permasalahan

Pada tugas akhir ini permasalahannya adalah menentukan model matematis motor DC, menentukan permukaan luncur, besarnya nilai penguatan dan simulasi.

1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan tugas akhir, permasalahan di atas dibatasi sebagai berikut:

1. Simulasi dan analisa menggunakan perangkat lunak MATLAB.
2. Metode yang digunakan adalah *sliding mode control*.

3. Analisis perbandingan hanya pada kecepatan motor

1.4 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk menghasilkan suatu kontroler yang dapat mengatur kecepatan motor DC sesuai dengan keinginan dan tahan terhadap gangguan dari luar sistem. Dibuatnya tugas akhir ini diharapkan memberikan manfaat terhadap pembaca, diantaranya pemahaman lebih lanjut mengenai *sliding mode control* sebagai salah satu metode kontrol dan kontroler yang dihasilkan dengan *sliding mode control* dapat menjadi alternatif pembelajaran.

1.5 Sistematika Penulisan

Bab I Pendahuluan

Terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, sistematika penulisan, metodologi penelitian, dan relevansi

Bab II Dasar Teori

Berisi teori penunjang yang membahas tentang motor DC *shunt* berbeban dan *sliding mode control*.

Bab III Perancangan Sistem

Model matematis dan diagram blok dari motor DC *shunt* berbeban dan *sliding mode control*.

Bab IV Simulasi dan Analisa

Hasil running program matlab dari diagram blok motor DC *shunt* berbeban dan *sliding mode control*. Pengaruh yang didapat setelah menggunakan *sliding mode control* pada *plant*.

Bab V Kesimpulan

Berisi tentang kesimpulan dan saran-saran.

1.6 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pembelajaran mengenai model matematis kecepatan motor DC dan mengenai *sliding mode control* dari jurnal, buku-buku, dan internet.

2. Pengumpulan Data
Penulis melaksanakan pengumpulan data-data mengenai *sliding mode control* dan motor dc *shunt*.
3. Pemodelan dan simulasi
Setelah mendapatkan data dan hasil pengolahannya, penulis akan memodelkannya dalam bentuk simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB .
4. Analisis Data
Dari simulasi akan didapatkan suatu hasil yang nantinya akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah selisih *error*.
5. Penulisan Buku Tugas Akhir
Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan. Berdasarkan analisis data, maka penulis dapat mengambil kesimpulan tentang bagaimana positif dan negatifnya SMC dalam pengendalian kecepatan motor DC.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti lanjutan untuk meningkatkan *hitting time* dan mengurangi *chattering*.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II DASAR TEORI

2.1 Pendahuluan

Motor arus searah (*direct current*) merupakan motor yang paling banyak digunakan dalam aplikasi mesin listrik yang membutuhkan pengaturan kecepatan dan pengontrolan torsi dengan kehandalan yang tinggi. Hal ini dikarenakan fluks dan torsi motor arus searah lebih mudah diatur, yaitu dengan mengubah arus jangkarnya. Disamping itu, pengontrolan motor DC lebih sederhana dan lebih mudah (tanpa membutuhkan peralatan elektronika yang kompleks). Motor arus searah menggunakan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Dengan memberikan beda tegangan pada terminal, motor akan berputar pada satu arah, dan bila polaritas dari tegangan tersebut dibalik maka arah putaran motor akan terbalik pula. Polaritas dari tegangan yang diberikan pada dua terminal menentukan arah putaran motor sedangkan besar dari beda tegangan pada kedua terminal menentukan kecepatan motor. Motor DC memiliki 2 bagian dasar [1]:

- a. Bagian yang tetap/stasioner yang disebut stator. Stator ini menghasilkan medan magnet, baik yang dibangkitkan dari sebuah koil (elektro magnet) ataupun magnet permanen.
- b. Bagian yang berputar disebut rotor. Rotor ini berupa sebuah koil dimana arus listrik mengalir.

Secara umum ada tiga metode pengaturan yang sering digunakan untuk mengatur kecepatan motor , yaitu :

- a. Pengaturan arus medan (*field current control*)
- b. Pengaturan tahanan jangkar (*armature circuit resistance control*)
- c. Pengaturan tegangan terminal jangkar (*armature terminal voltage control*)

Dewasa ini, kemajuan teknologi di bidang elektronika daya begitu pesat, pengaturan motor yang sebelumnya sering dilakukan dengan cara konvensional, sekarang telah banyak beralih menggunakan metode kontrol. Salah satu metode kontrol yang dapat digunakan dalam pengaturan kecepatan motor DC adalah *sliding mode control* (SMC).

SMC merupakan kendali umpan balik penskalaan frekuensi tinggi yang memiliki sifat kokoh. Kendali SMC dapat dipilih karena kekokohan yang dimiliki sistem kendali ini diharapkan dapat mengatasi permasalahan perubahan parameter dari motor DC akibat pembebanan. Perubahan parameter dapat mengakibatkan perubahan respon yang cukup signifikan. Kekurangan yang dimiliki oleh kendali SMC adalah timbulnya fenomena *chattering* yang berpengaruh terhadap stabilitas sistem kendali.

2.2 Sistem Kontrol [2]

Sistem kontrol merupakan suatu kumpulan cara atau metode yang dipelajari dari kebiasaan-kebiasaan manusia dalam bekerja, dimana manusia membutuhkan suatu pengamatan kualitas dari apa yang telah mereka kerjakan sehingga memiliki karakteristik yang sesuai dengan yang diharapkan pada mulanya. Perkembangan teknologi menyebabkan manusia selalu terus belajar untuk mengembangkan dan mengoperasikan pekerjaan-pekerjaan kontrol yang semula dilakukan manusia menjadi serba otomatis (dikendalikan oleh mesin).

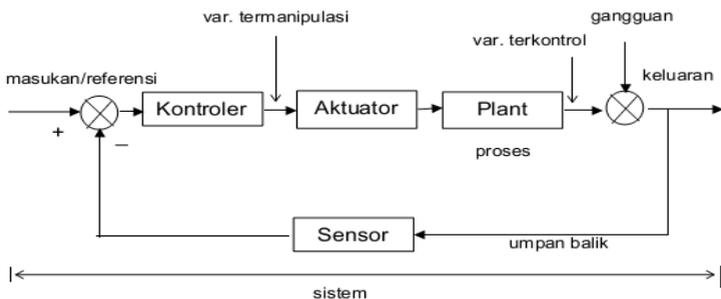
Dalam aplikasinya, sistem kontrol memegang peranan penting dalam teknologi. Sebagai contoh, otomatisasi industri dapat menekan biaya produksi, meningkatkan kualitas, dan dapat menggantikan pekerjaan-pekerjaan rutin yang membosankan. Sehingga dengan demikian diharapkan akan meningkatkan kinerja suatu sistem secara keseluruhan, dan pada akhirnya memberikan keuntungan bagi manusia yang menerapkannya.

Sistem kontrol berfungsi untuk mengatur keluaran dalam suatu kondisi atau keadaan oleh masukan melalui elemen sistem kontrol. Dengan adanya sasaran ini, maka kualitas keluaran yang dihasilkan tergantung dari proses yang dilakukan sistem kontrol ini.

Berikut diberikan beberapa definisi istilah yang sering dipakai pada sistem kontrol:

- a. Sistem (*system*) adalah kombinasi dari komponen-komponen yang bekerja bersama-sama membentuk suatu objek tertentu.
- b. Variabel terkontrol (*controlled variable*) adalah suatu besaran (*quantity*) atau kondisi (*condition*) yang terukur dan terkontrol. Pada keadaan normal merupakan keluaran dari sistem.

- c. Variabel termanipulasi (*manipulated variable*) adalah suatu besaran atau kondisi yang divariasikan oleh kontroler sehingga mempengaruhi nilai dari variabel terkontrol.
- d. Kontrol (*control*) artinya mengukur nilai dari variabel terkontrol dari sistem dan mengaplikasikan variabel termanipulasi pada sistem untuk mengoreksi atau mengurangi deviasi yang terjadi terhadap nilai keluaran yang dituju.
- e. Plant (*plant*) adalah sesuatu obyek fisik yang dikontrol.
- f. Proses (*process*) adalah sesuatu operasi yang dikontrol. Contoh : proses kimia, proses ekonomi, proses biologi, dll.
- g. Gangguan (*disturbance*) adalah sinyal yang mempengaruhi nilai keluaran sistem.
- h. Kontrol umpan balik (*feedback control*) adalah operasi untuk mengurangi perbedaan antara keluaran sistem dengan referensi masukan.
- i. Kontroler (*controller*) adalah suatu alat atau cara untuk memodifikasi sistem sehingga karakteristik sistem dinamik (*dynamic system*) yang dihasilkan sesuai dengan yang kita kehendaki.
- j. Sensor adalah peralatan yang digunakan untuk mengukur keluaran sistem dan menyatakannya dengan sinyal masukan sehingga bisa dilakukan suatu operasi hitung antara keluaran dan masukan.
- k. Aksi kontrol (*control action*) adalah besaran atau nilai yang dihasilkan oleh perhitungan kontroler untuk diberikan pada plant (pada kondisi normal merupakan variabel termanipulasi).
- l. Aktuator (*actuator*) adalah suatu peralatan atau kumpulan komponen yang menggerakkan plant.



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kontrol

Suatu sistem kontrol yang sederhana biasanya terdiri atas kontroler dan *plant*. Sedangkan sistem kontrol yang lebih kompleks seperti pada Gambar 2.1 terdiri atas kontroler, aktuator, *plant*, dan sensor sebagai umpan balik.

Berdasarkan adanya tidaknya umpan balik, sistem dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu :

a. Sistem Kontrol Loop Terbuka (*Open Loop Control System*)

Suatu sistem kontrol yang mempunyai karakteristik dimana nilai keluaran tidak memberikan pengaruh pada aksi kontrol disebut sistem kontrol loop terbuka (*open loop control system*). Contoh dari sistem loop terbuka adalah operasi mesin cuci. Penggilingan pakaian, pemberian sabun, dan pengeringan yang merupakan operasi mesin cuci tidak akan berubah (hanya sesuai dengan yang diinginkan seperti semula) walaupun tingkat kebersihan pakaian (sebagai keluaran sistem) bisa sesuai atau kurang baik akibat adanya faktor-faktor yang kemungkinan tidak diprediksikan sebelumnya. Contoh sistem kontrol loop terbuka adalah Gambar 2.2.



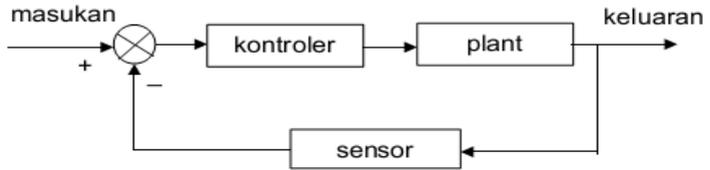
Gambar 2.2 Sistem Kontrol Loop Terbuka

Sistem kontrol loop terbuka ini memang lebih sederhana, murah, dan mudah dalam desainnya, akan tetapi akan menjadi tidak stabil dan seringkali memiliki tingkat kesalahan yang besar bila diberikan gangguan dari luar.

b. Sistem Kontrol Loop Tertutup (*Closed Loop Control System*)

Sistem kontrol loop tertutup adalah identik dengan sistem kontrol umpan balik, dimana nilai dari keluaran akan ikut mempengaruhi pada aksi kontrolnya. Adanya kesalahan ini membuat kontroler berusaha memperbaikinya sehingga didapatkan kesalahan yang semakin lama semakin mengecil. Langkah ini dilakukan untuk mencapai kestabilan sistem. Nilai kesalahan yang semakin kecil atau mendekati nol, dapat dikatakan bahwa

sistem stabil atau terkontrol. Contoh sistem kontrol loop tertutup adalah Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem Kontrol Loop Tertutup

Dibandingkan dengan sistem kontrol loop terbuka, sistem kontrol loop tertutup memang lebih rumit, mahal, dan sulit dalam desain. Akan tetapi tingkat kestabilannya yang relatif konstan dan tingkat kesalahannya yang kecil bila terdapat gangguan dari luar, membuat sistem kontrol ini lebih banyak menjadi pilihan para perancang sistem kontrol. Dalam perancangan sistem kontrol, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menganalisa sistem yang akan dikontrol terlebih dahulu. Pembuatan model yang lebih sederhana akan mempermudah kita dalam menganalisa sistem tersebut. Kemudian pemodelan tersebut dapat kita nyatakan dalam suatu persamaan matematis, sehingga aplikasi perhitungan matematis akan sangat memungkinkan dalam menganalisa sistem tersebut. Selanjutnya untuk mendapatkan kinerja sistem yang sesuai dengan kehendak kita, maka diperlukan data-data yang akurat tentang pengujian sistem tersebut terhadap masukan tertentu sehingga kita dapat menemukan cara yang tepat dalam mengatasi permasalahan yang timbul. Persoalan lain yang seringkali timbul dalam perancangan sistem kontrol adalah masalah kestabilan. Dalam menganalisa suatu sistem kontrol dan usaha perbaikan kinerja sistem seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, diperlukan penggambaran -penggambaran secara grafis yang dapat memvisualisasikan karakteristik suatu sistem. Setelah pengenalan karakteristik dari suatu sistem dapat dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah pembuatan suatu kontroler atau kompensator yang berfungsi untuk memperbaiki kinerja sistem tersebut.

2.2.1 Sistem Kontrol *Robust* [3]

Pada awalnya teori kontrol *robust* (1980-1990an) diciptakan karena keinginan untuk memperbaiki metode *state space* (1960an-1970an) yang masih memiliki kekurangan terhadap ketahanan dari gangguan. Kontrol *robust* adalah sebuah cabang dari teori kontrol, yang merupakan suatu kontroler yang tidak peka terhadap perubahan parameter, kesalahan model dan gangguan (bersifat kokoh).

Metode *robust* bertujuan untuk mencapai kinerja yang kokoh dan/atau stabilitas jika terjadi kesalahan pemodelan dan gangguan-gangguan. Arti kata dari “*robust*” adalah kokoh atau jika dikaitkan dengan sistem maka sistem dikatakan *robust* jika pada saat sifat tersebut berada pada satu titik, maka sifat tersebut akan mempunyai kemampuan bertahan terhadap keadaan sekitarnya sehingga mempunyai daya tahan. Tujuan pendesainan kontroler *robust* adalah :

- Menghilangkan *steady state error*
- Memperbaiki dinamika dari *plant*
- Menghilangkan efek dari *disturbance*
- Mengambil perhatian terhadap perubahan yang disebabkan oleh perubahan parameter model dan perubahan *set point*, biasa disebut *robustness*

Suatu sistem dinyatakan *robust* bila:

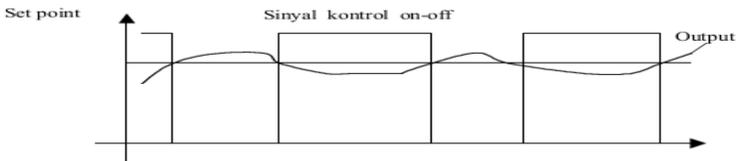
- a. Memiliki sensitivitas rendah
- b. Bersifat stabil terhadap *range* variasi parameter tertentu.
- c. Performansi terus memenuhi spesifikasi bila ada serangkaian perubahan dalam parameter sistem.

Permasalahan utama dalam sistem *robust*:

- a. Permasalahan sintesis
Pengontrol yang telah diperoleh dilakukan pemeriksaan terhadap sinyal-sinyal terkontrolnya (*tracking error* sinyal pengontrolnya). Contoh kontrol optimal H_2 dan H_∞ .
- b. Permasalahan analisis
Mendesain sebuah pengontrol sistem dinamik sehingga sinyal- sinyal terkontrolnya memenuhi sifat- sifat yang diinginkan.

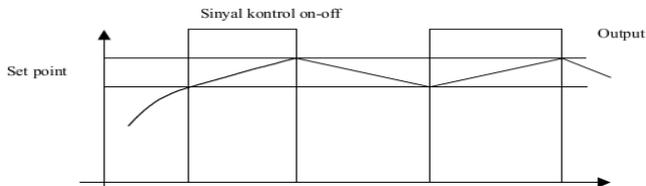
2.2.2 Kontroler *On-Off* [4]

Pada sistem kontrol dua posisi, elemen aktuasi hanya mempunyai dua posisi yang tetap. Kontrol *on-off* ini banyak digunakan di industri karena murah dan sederhana. Sinyal kontrol akan tetap pada satu keadaan dan akan berubah ke keadaan lainnya bergantung pada nilai *error* positif atau negatif. $u(t) =$ sinyal kontrol, $e(t) =$ sinyal *error*, $u(t) = U1, e(t) > 0 = U2, e(t) < 0$. Kontroler dua posisi pada umumnya dijumpai pada komponen elektrik (*relay*) dan komponen pneumatik (katup dan silinder). Ilustrasi dari kontroler *on-off* adalah sebagai berikut:



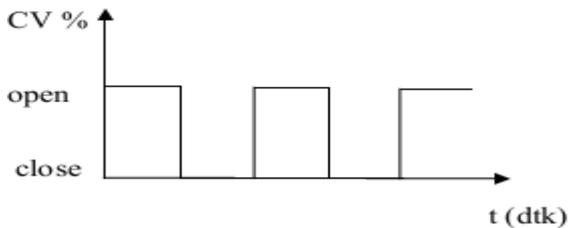
Gambar 2.4 Kontroler *On-Off*

Dari Gambar 2.4 dapat diamati bahwa jika *output* lebih besar dari *set point*, aktuator akan *off*. *Output* akan turun dengan sendirinya sehingga menyentuh *set point* lagi. Pada saat itu, sinyal kontrol akan kembali *on* (aktuator *on*) dan mengembalikan *output* kepada *set point*-nya. Demikian seterusnya sinyal kontrol dan aktuator akan *on-off* terus menerus. Kelemahan dari kontroler *on-off* ini adalah jika *output* berosilasi di sekitar *set point* (keadaan yang memang diinginkan) akan menyebabkan aktuator bekerja keras untuk *on-off* dengan frekuensi yang tinggi. Hal ini akan menyebabkan kontroler akan cepat aus dan memakan energi yang banyak (boros). Untuk sedikit mengatasi hal ini maka dibuat suatu band pada *set point* sehingga mengurangi frekuensi *on-off* dari kontroler. Ilustrasinya adalah seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kontroler *On-Off* dengan Histeris

Sinyal kontrol akan *off* ketika *output* menyentuh batas atas dan baru *on* kembali ketika menyentuh batas bawah. *Band* dari *set point* ini disebut juga *differential gap*. Dengan keadaan seperti ini serta mengatur besarnya *differential gap* maka frekuensi *on-off* dapat dikurangi tetapi harus dibayar dengan penurunan akurasi terhadap *set point*. Karakteristik kontroler *on-off* ini hanya bekerja pada 2 posisi, yaitu *on* dan *off*, seperti pada Gambar 2.6. Kerja kontroler *on-off* banyak digunakan pada aksi pengontrolan yang sederhana karena harganya murah. Karena sistem kerja yang digunakan adalah *on-off* saja, hasil output dari sistem pengendalian ini akan menyebabkan proses variabel tidak akan pernah konstan. Besar kecilnya fluktuasi *process* variabel ditentukan oleh titik dimana kontroler dalam keadaan *on* dan *off*. Pengendalian dengan aksi kontrol ini juga menggunakan *feedback*.



Gambar 2.6 Respon Sinyal Kontroler *On-Off*

2.3 Motor DC *Shunt* [5]

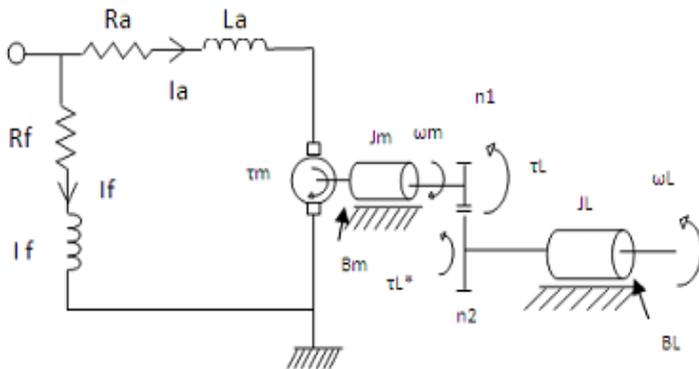
Sebuah motor DC *shunt* menghubungkan dinamo dan gulungan medan secara paralel atau *shunt* dengan sumber daya DC. Jenis motor ini memiliki pengaturan kecepatan yang baik bahkan pada beban bervariasi, tetapi tidak memiliki torsi awal dari motor seri DC lainnya. Motor jenis ini biasanya digunakan untuk industri, aplikasi kecepatan disesuaikan, seperti alat-alat mesin, berkelok-kelok / mesin *unwinding* dan *tensioners*.

Pada motor *shunt*, gulungan medan (medan *shunt*) disambungkan secara paralel dengan gulungan dinamo (A). Oleh karena itu total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus dinamo.

Karakter kecepatan motor DC tipe *shunt* adalah : Kecepatan pada prakteknya konstan tidak tergantung pada beban (hingga *torque* tertentu setelah kecepatannya berkurang) dan oleh karena itu cocok untuk penggunaan komersial dengan beban awal yang rendah, seperti peralatan mesin. Kecepatan dapat dikendalikan dengan cara memasang tahanan dalam susunan seri dengan dinamo (kecepatan berkurang) atau dengan memasang tahanan pada arus medan (kecepatan bertambah). Karakter kecepatan motor DC tipe *shunt* adalah:

- Kecepatan pada prakteknya konstan tidak tergantung pada beban (hingga *torque* tertentu setelah kecepatannya berkurang) dan oleh karena itu cocok untuk penggunaan komersial dengan beban awal yang rendah, seperti peralatan mesin.
- Kecepatan dapat dikendalikan dengan cara memasang tahanan dalam susunan seri dengan dinamo (kecepatan berkurang) atau dengan memasang tahanan pada arus medan (kecepatan bertambah).

Model rangkaian motor DC *shunt* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Motor DC *Shunt* Berbeban

Komponen-komponen penyusun motor DC :

1. Badan motor (rangka).

Rangka (*frame* atau *yoke*) mesin arus searah seperti juga mesin-mesin listrik lainnya secara umum memiliki dua fungsi, yaitu :

- Merupakan sarana pendukung mekanik untuk mesin secara keseluruhan.
- Untuk membawa fluks magnetik yang dihasilkan oleh kutub-kutub mesin.

Untuk mesin kecil, dipertimbangan harga lebih dominan daripada beratnya, biasanya rangkanya terbuat dari besi tuang (*cast iron*), tetapi untuk mesin-mesin besar umumnya terbuat dari baja tuang (*cast steel*) atau lembaran baja (*rolled steel*). Rangka ini pada bagian dalam dilaminasi untuk mengurangi rugi-rugi inti, selain itu rangka ini juga harus memiliki permeabilitas yang tinggi disamping kuat secara mekanik.

Biasanya pada motor terdapat papan nama (*name plate*) yang bertuliskan spesifikasi umum atau data-data teknik dari mesin, juga terdapat kotak ujung yang merupakan tempat-tempat ujung-ujung belitan penguat medan dan lilitan jangkar.

2. Kutub

Medan penguat atau magnet medan terdiri atas inti kutub dan sepatu kutub. Adapun fungsi dari sepatu kutub adalah :

- Menyebarkan fluks pada celah udara dan juga karena merupakan bidang lebar maka akan mengurangi reluktansi jalur magnet.
- Sebagai pendukung secara mekanik untuk kumparan penguat atau kumparan medan.

Inti kutub terbuat dari lembaran-lembaran besi tuang atau baja tuang. Sepatu kutub dilaminasi dan dibaut atau dikeling (*rivet*) ke rangka mesin. Sebagaimana diketahui bahwa fluks magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub-kutub magnet buatan dengan prinsip elektromagnetik. Kumparan penguat atau kumparan kutub terbuat dari kawat tembaga (berbentuk bulat atau strip/persegi) yang dililitkan sedemikian rupa dengan ukuran tertentu. Kumparan penguat medan berfungsi untuk mengalirkan arus listrik untuk terjadinya proses elektromagnetik.

3. Inti Jangkar

Inti jangkar yang umum digunakan dalam motor arus searah adalah berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan

tempat terbentuknya ggl induksi. Inti jangkar yang terbuat dari bahan ferromagnetik, dengan maksud agar komponen-komponen (lilitan jangkar) terletak dalam daerah yang induksi magnetnya besar, supaya ggl induksi dapat bertambah besar. Seperti halnya inti kutub magnet maka jangkar dibuat dari bahan-bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus *linier*. Bahan yang digunakan untuk jangkar ini sejenis campuran baja silikon. Pada umumnya alur tidak hanya diisi satu kumparan yang tersusun secara berlapis.

4. Kumparan jangkar

Kumparan jangkar pada motor arus searah berfungsi tempat terbentuknya ggl induksi.

5. Kumparan medan

Fungsi kumparan medan ini adalah untuk membangkitkan fluksi yang akan dipotong oleh konduktor jangkar.

6. Komutator

Fungsi komutator untuk fasilitas penghubung arus dari konduktor jangkar, sebagai penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat membuat sesuatu kerjasama yang disebut komutasi. Agar menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar. Dalam hal ini setiap belahan (segmen) komutator tidak lagi merupakan bentuk separoh cincin, tetapi sudah berbentuk lempengan-lempengan (segmen komutator) terdapat bahan isolasi.

7. Sikat-sikat

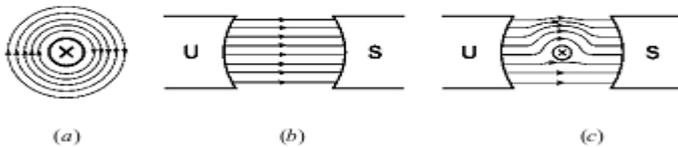
Sikat-sikat berfungsi sebagai jembatan bagi aliran arus ke kumparan jangkar. Dimana permukaan sikat ditekan ke permukaan segmen komutator untuk menyalurkan arus listrik. Besarnya tekanan pegas dapat diatur sesuai dengan keinginan.

Disamping itu sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Karbon yang ada diusahakan memiliki konduktivitas yang tinggi untuk mengurangi rugi-rugi listrik. Agar gesekan antara komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator, maka sikat harus lebih

lunak daripada komutator. Adanya gesekan dapat menimbulkan adanya rugi-rugi pada motor. Rugi-rugi ini dapat berupa gesekan atau panas. Rugi-rugi dapat mempengaruhi kinerja dari motor, sehingga motor tidak bekerja sesuai dari keadaan yang diinginkan.

2.4 Prinsip Kerja Motor Arus Searah [5]

Sebuah konduktor yang dialiri arus mempunyai medan magnet disekelilingnya. Pada saat konduktor yang dialiri arus listrik ditempatkan pada suatu medan magnet, maka konduktor akan mengalami gaya mekanik, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh Penempatan Konduktor Berarus dalam Medan Magnet

Pada Gambar 2.8.a menggambarkan sebuah konduktor yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet disekelilingnya. Arah medan magnet yang dihasilkan oleh konduktor dapat diperoleh dengan menggunakan kaidah tangan kanan. Kuat medan tergantung pada besarnya arus yang mengalir pada konduktor.

Sedangkan Gambar 2.8.b menunjukkan sebuah medan magnet yang diakibatkan oleh kutub-kutub magnet utara dan selatan. Arah medan magnet adalah dari kutub utara menuju kutub selatan. Pada saat konduktor dengan arah arus menjauhi pembaca ditempatkan di dalam medan magnet seragam, maka medan gabungannya akan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.c. Daerah di atas konduktor, medan yang ditimbulkan konduktor adalah dari kiri ke kanan, atau pada arah yang sama dengan medan utama. Sementara di bawahnya, garis-garis magnet dari konduktor arahnya berlawanan dengan dengan medan utama. Hasilnya adalah memperkuat medan atau menambah kerapatan fluksi di atas konduktor dan melemahkan medan atau mengurangi kerapatan fluksi di bawah konduktor. Dalam keadaan ini,

fluksi di daerah di atas konduktor yang kerapatannya bertambah akan mengusahakan gaya ke bawah kepada konduktor, untuk mengurangi kerapatannya. Hal ini menyebabkan konduktor mengalami gaya berupa dorongan ke arah bawah. Begitu juga halnya bila arah arus dalam konduktor dibalik. Kerapatan fluksi yang berada di bawah konduktor akan bertambah sedangkan kerapatan fluksi di atas konduktor berkurang, sehingga konduktor akan mendapatkan gaya tolak ke arah atas. Konduktor yang mengalirkan arus dalam medan magnet cenderung bergerak tegak lurus terhadap medan. Pada saat kumparan medan dihubungkan dengan sumber tegangan, mengalir arus medan if pada kumparan medan karena rangkaian tertutup sehingga menghasilkan fluksi magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan. Selanjutnya ketika kumparan jangkar dihubungkan ke sumber tegangan, pada kumparan jangkar mengalir arus jangkar ia. Arus yang mengalir pada konduktor-konduktor kumparan jangkar menimbulkan fluksi magnet yang melingkar. Fluksi jangkar ini memotong fluksi dari kedua kutub medan, sehingga menyebabkan perubahan kerapatan fluksi dari medan utama. Hal ini menyebabkan jangkar mengalami gaya sehingga menimbulkan torsi. Gaya yang dihasilkan pada setiap konduktor dari sebuah jangkar, merupakan akibat aksi gabungan medan utama dan medan di sekeliling konduktor. Gaya yang dihasilkan berbanding lurus dengan besar fluksi medan utama dan kuat medan di sekeliling konduktor. Medan di sekeliling masing-masing konduktor jangkar tergantung pada besarnya arus jangkar yang mengalir pada konduktor tersebut. Arah gaya ini dapat ditentukan dengan kaidah tangan kiri.

Besarnya gaya Lorentz (F) dapat ditulis seperti pada Persamaan 2.1.

$$F = B \cdot i \cdot l \dots \dots \dots (2.1)$$

di mana :

- F = gaya Lorentz (Newton)
- i = arus (Ampere)
- l = panjang penghantar (meter)
- B = rapat fluksi (Weber/m²)

Sedangkan torsi yang dihasilkan motor dapat ditentukan dengan Persamaan 2.2.

$$\tau = F \cdot r \dots\dots\dots(2.2)$$

Bila torsi yang dihasilkan motor lebih besar dari torsi beban maka motor akan berputar. Besarnya torsi beban dapat ditulis sesuai Persamaan 2.3. Sedangkan besarnya nilai k didapat sesuai Persamaan 2.4.

$$\tau = k \cdot \Phi \cdot ia \dots\dots\dots(2.3)$$

$$k = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana :

- τ = torsi (N.m)
- r = jari-jari rotor (m)
- k = konstanta (bergantung pada ukuran fisik motor)
- Φ = fluksi setiap kutub
- ia = arus jangkar (A)
- p = jumlah kutub
- z = jumlah konduktor
- a = cabang paralel

2.4.1 Model Matematis

Berdasarkan Gambar 2.7, pemodelan matematis motor dc *shunt* berbeban dapat dirumuskan sebagai berikut

a. Persamaan differensial pada rangkaian medan

Persamaan pada rangkaian medan untuk mengetahui besarnya nilai i_f sesuai dengan Persamaan 2.6, dengan terlebih dahulu mengetahui besarnya nilai tegangan masuk sesuai Persamaan 2.5.

$$E(t) = Lf \cdot \frac{dif(t)}{dt} + Rf \cdot if(t)$$

$$E(s) = (Lf.s + Rf)if(s)..... (2.5)$$

$$if(s) = \frac{E(s)}{Lf.s + Rf}..... (2.6)$$

b.Persamaan differensial pada rangkaian kumparan jangkar

Persamaan pada rangkaian kumparan jangkar untuk mengetahui besarnya nilai i_a sesuai dengan Persamaan 2.8, dengan terlebih dahulu mengetahui besarnya nilai beda tegangan pada rangkaian kumparan jangkar sesuai Persamaan 2.7.

$$E(t) - Eggl(t) = La \frac{dia(t)}{dt} + Ra. ia(t)$$

$$E(s) - Eggl(s) = (La.s + Ra)ia(s)... (2.7)$$

$$ia(s) = \frac{1}{La.s + Ra} (E(s) - Eggl(s)) (2.8)$$

c.Torsi yang dibangkitkan

Nilai torsi yang dibangkitkan oleh motor sesuai dengan Persamaan 2.9.

$$\tau m = Ktm. ia(t). if(t)$$

$$\tau m = Ktm. ia(s). if(s)..... (2.9)$$

d.Torsi pada poros motor

Besarnya kecepatan putar motor sesuai Persamaan 2.10.

$$\tau m(t) - \tau L(t) - \tau Bm(t) = Jm \frac{d\Omega m(t)}{dt}$$

$$\tau m(s) - \tau L(s) - Bm(s). \Omega m(s) = Jm \frac{d\Omega m(s)}{dt}$$

$$\tau m(s) - \tau L(s) = (Jm.s + Bm)\Omega m(s)$$

$$\Omega m(s) = \frac{1}{Jm.s+Bm}(\tau m(s) - \tau L(s)) \dots \dots (2.10)$$

e. Roda gigi

Pada bagian akan ditentukan hubungan antara rasio roda gigi dengan torsi pada beban sesuai Persamaan 2.11.

$$\Omega L(s) = \frac{n1}{n2}\Omega m(s)$$

$$\tau L^* = \frac{n2}{n1}\tau L$$

$$\tau L = \frac{n1}{n2}\tau L^* \dots \dots \dots (2.11)$$

f. Persamaan torsi pada beban

Nilai torsi pada beban sesuai Persamaan 2.12. Sedangkan besarnya kecepatan putar motor setelah pembebanan sesuai Persamaan 2.13.

$$\tau L^*(s) = (JL.s + BL)\Omega L(s) \dots \dots \dots (2.12)$$

$$E_{ggl} = C.n.\phi = K_{ggl}.if.\Omega m \dots \dots \dots (2.13)$$

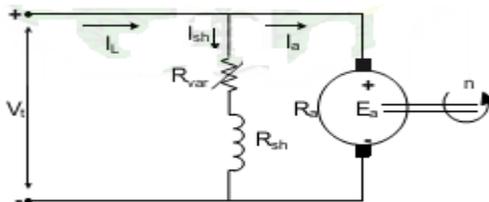
2.4.2 Jenis-Jenis Pengaturan Kecepatan Motor DC

Motor DC pada saat sekarang ini diberi sumber AC yang lalu disearahkan dengan dioda dan bila dibandingkan langsung dengan sumber DC yang di dalam aplikasinya banyak juga yang mengantikan dioda dengan thyristor yang digunakan dalam berbagai kombinasi kontrol kecepatan melalui penyesuaian tegangan ke motor. Dasar metode pengendalian motor DC sebagai berikut :

1. Pengaturan medan
2. Pengaturan tegangan
3. Pengaturan tahanan jangkar

a. Pengaturan Medan

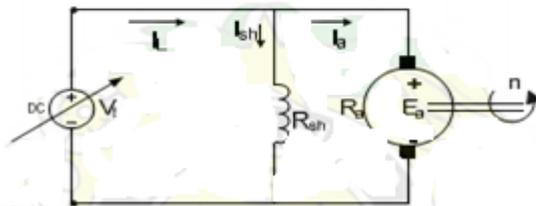
Pengaturan ini dapat dilakukan dengan mengatur arus medan *shunt* dengan melemahkan dan menaikkan melalui pengaturan tahanan variabel yang dihubungkan seri dengan kumparan medan seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pengaturan Medan pada Motor DC Penguatan *Shunt*

b. Pengaturan Tegangan

Pengaturan ini dilakukan dengan mengatur tegangan yang disuplai ke motor seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pengaturan Tegangan pada Motor DC Penguatan *Shunt*

Motor DC pada saat sekarang ini diberi sumber AC yang lalu disearahkan dengan dioda dan bila dibandingkan langsung dengan sumber DC yang didalam aplikasinya

banyak juga yang menggantikan dioda dengan thyristor yang digunakan dalam berbagai kombinasi kontrol kecepatan melalui penyesuaian tegangan ke motor. Berdasarkan pengaturan tegangan menggunakan thyristor terbagi atas tiga bagian sebagai berikut :

i. Kontrol phasa.

Dimana sumber AC dipotong gelombang negatifnya sehingga yang terhubung ke motor adalah gelombang positifnya dan pengontrolan ini dapat digunakan untuk semua daya motor.

ii. Integral siklus kontrol

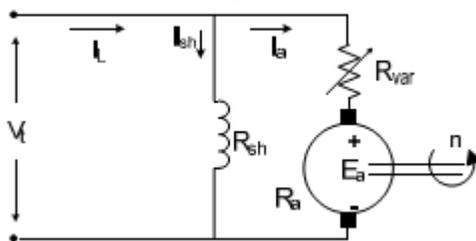
Dengan memotong gelombang AC sehingga mengubah nilai tegangan AC atau disebut juga AC kontroler, yang dihubungkan dengan jembatan dioda. Metode ini hanya bermanfaat untuk ukuran motor yang mempunyai daya yang kecil.

iii. Kontrol *chopper*

Dengan mengendalikan tegangan rms masukan ke motor melalui metode pensaklaran. Metode ini digunakan untuk pada saat *start* awal motor.

c. Pengaturan Tahanan Jangkar

Pengaturan ini dapat dilakukan dengan mengatur tahanan jangkar dengan menghubungkan seri dengan tahanan variabel seperti Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Pengaturan Tahanan Jangkar pada Motor DC Penguatan *Shunt*

2.5 Sliding Mode Control (SMC) [6]

SMC merupakan sebuah kendali umpan balik pensaklaran berkecepatan tinggi (*high speed switching feedback control*) yang efektif dan kokoh dalam mengendalikan sistem *linier* maupun *non linier*. Sistem kendali ini kokoh karena menyediakan sebuah metoda perancangan sistem yang tidak peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan dari luar.

Pada prinsipnya, SMC menggunakan sebuah hukum kendali penskalaran berkecepatan tinggi untuk membawa trajektori status dari sistem *linier* atau *non linier* menuju sebuah permukaan (*hyperplane*) tertentu dalam ruang status (permukaan luncur/*sliding surface*), kemudian trajektori status tersebut dipertahankan agar tetap meluncur pada permukaan tersebut. Proses pemeliharaan trajektori status pada permukaan luncur mengakibatkan terjadinya osilasi pada permukaan luncur. Osilasi ini sering disebut dengan *chattering*. Fenomena *chattering* pada permukaan luncur akan berdampak pada stabilitas sistem kendali.

Waktu yang dibutuhkan oleh trajektori status untuk mencapai permukaan luncur akan berdampak terhadap kecepatan tanggapan sistem terhadap waktu. Waktu yang dibutuhkan trajektori status untuk mencapai permukaan luncur sering disebut dengan *hitting time*. Salah satu keuntungan dari SMC adalah ketika sistem mengenai permukaan luncur, maka sistem tersebut tidak akan peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan dari luar. Untuk menjaga perilaku sistem sehingga tidak peka terhadap perubahan lingkungan, maka dibutuhkan *hitting time* yang kecil agar sistem cepat mengenai permukaan luncur. *Hitting time* dan *chattering* yang kecil merupakan dua hal yang sangat penting dalam merancang sistem SMC.

Sistem *non linier* dimodelkan dalam persamaan status pada Persamaan 2.14.

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t)u(t) \dots \dots \dots (2.14)$$

dengan $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ merupakan *vector* status sistem, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ merupakan *vector* masukan kendali, fungsi $f(x, t) \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ diasumsikan kontinu dan memiliki turunan yang terbatas. Setiap

element $u_i(t)$ yang merupakan bagian dari *vector* masukan kendali $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ dapat ditulis seperti pada Persamaan 2.15.

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t) & \sigma_i(x) > 0 \\ u_i^-(x, t) & \sigma_i(x) < 0 \end{cases} \quad i = 1, \dots, m \quad \dots\dots(2.15)$$

dengan $\sigma_i(x) = 0$ adalah permukaan luncur ke- i yang merupakan bagian dari permukaan luncur berdimensi $(n - m)$.

Secara umum ada dua tahap dalam perancangan SMC, yaitu :

1. Perancangan permukaan luncur

Permukaan luncur dapat dituliskan dalam Persamaan 2.16.

$$\sigma(x) = Sx(t) \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan S adalah matrik berukuran $m \times n$ dan memiliki elemen yang konstan. Parameter S ini disebut sebagai konstanta persamaan permukaan luncur. Permukaan luncur sendiri merupakan fungsi dari status sistem. Nilai matrik ini tidak dapat ditentukan dengan sembarang, sebab kestabilan sistem dipermukaan luncur akan ditentukan oleh nilai konstanta tersebut.

Agar penjejakan dapat tercapai oleh suatu masukan terbatas u , kondisi awal dari status yang diinginkan x_d dibuat sedemikian hingga $x_d(0) = x(0)$. Galat penjejakan pada status x , didefinisikan pada Persamaan 2.17.

$$e = x - x_d = [e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)}]^T \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan e adalah *vector* galat penjejakan. Untuk sistem dengan masukan tunggal, didefinisikan suatu permukaan yang berubah waktu $\sigma(t)$ dalam ruang status \mathfrak{R}^n dengan persamaan skalar $\sigma(x; t) = 0$, sesuai Persamaan 2.18.

$$\sigma(x; t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e = \lambda^{n-1}e + \dot{e} \quad \dots\dots \dots(2.18)$$

dengan λ adalah konstanta positif dan n adalah orde sistem.

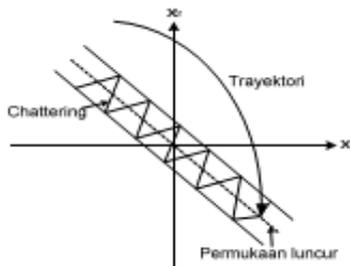
2. Perancangan SMC

Tahapan selanjutnya adalah merancang masukan kendali yang akan membawa trayektori status suatu sistem menuju permukaan luncur yang telah dirancang sebelumnya dan menjaganya agar tetap berada di dalamnya (dalam kondisi luncur). Secara umum masukan kendali merupakan m-vektor $u(t)$ yang setiap elemennya mempunyai bentuk seperti yang telah dituliskan pada Persamaan 2.15.

Pada perancangan ini hukum kendali $u(t)$ dibuat dengan menggunakan syarat kestabilan Lyapunov $\sigma^T \dot{\sigma} < 0$. Secara umum hukum kendali dapat dipisah menjadi dua bagian sinyal kendali yaitu u_{eq} dan u_n , sehingga hukum kendali sistem diperoleh dengan menjumlahkan kedua bagian sinyal kendali tersebut, seperti yang terlihat pada Persamaan 2.19.

$$u(t) = u_{eq} + u_n = -Kx \dots \dots \dots (2.19)$$

u_{eq} merupakan sinyal kendali ekivalen yang membawa trayektori status ke permukaan luncur, sedangkan u_n merupakan sinyal kendali natural untuk menjaga agar trayektori status tetap berada pada permukaan luncur, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.12. Proses pemeliharaan trayektori status pada permukaan luncur mengakibatkan terjadinya osilasi pada permukaan luncur. Osilasi ini sering disebut dengan *chattering*. Fenomena *chattering* pada permukaan luncur akan berdampak pada stabilitas dari sistem kendali.



Gambar 2.12 Diagram Fasa Trayektori Status

dengan mensubstitusikan Persamaan (2.14) dan (2.19), diperoleh dinamika lingkaran tertutup sistem seperti yang terlihat pada Persamaan 2.20.

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t)(u_{eq} + u_n) \dots \dots \dots (2.20)$$

Pada saat trayektori status sistem masuk ke permukaan luncur sehingga modus luncur terjadi, maka kondisi ini akan menghasilkan $\dot{\sigma}(x, t) = 0$ dan luncur sehingga modus luncur terjadi, maka kondisi ini akan menghasilkan $\sigma(x, t) = 0$ untuk $t \geq t_0$ sehingga diperoleh masukan kendali ekuivalen pada Persamaan 2.21.

$$u_{eq} = -(SB(x, t))^{-1} Sf(x, t) \dots \dots \dots (2.21)$$

Untuk mempertahankan trayektori status pada permukaan luncur, maka harus dipenuhi syarat keberadaan di permukaan luncur $\sigma^T \dot{\sigma} = \sigma(SBu_n) = \sigma u_n^* < 0$. Persamaan 2.22 berikut ini merupakan sinyal kendali untuk mempertahankan trayektori status pada permukaan luncur.

$$u_n = -k(SB(x, t))^{-1} sign(\sigma) \text{ jika } (SB(x, t)), \\ \text{invertible} \dots \dots \dots (2.22)$$

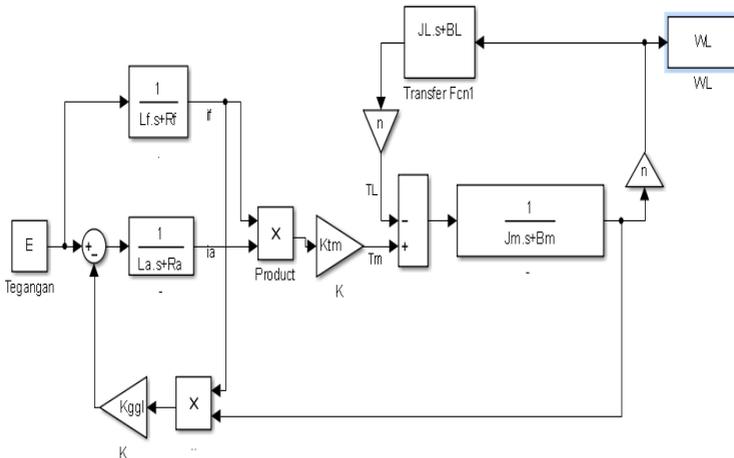
BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1 Diagram Blok

Diagram blok merupakan gambaran sejumlah komponen yang berperan dalam sistem kontrol, komponen tersebut memuat fungsi operasi matematis dan digambarkan dalam bentuk blok-blok terhadap aliran proses. Tiap-tiap blok terhubung satu sama lain melalui sinyal yang ditransmisikan. Secara sederhana, diagram blok terbagi menjadi dua, yaitu diagram blok sistem kalang terbuka (*open loop*) dan diagram blok kalang tertutup (*closed loop*).

Sistem kalang terbuka digunakan untuk mengidentifikasi perilaku sistem. Sedangkan kalang tertutup digunakan untuk proses pengontrolan.

Penggunaan diagram blok ini diharapkan dapat lebih memudahkan dalam proses pengindikasian sistem. Dari diagram blok inilah nantinya akan digunakan pada simulasi untuk melihat respon sistem. Blok diagram dari motor DC *shunt* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 3.1 Blok Diagram Simulasi Motor DC

3.2 Perancangan Motor Dc

Parameter-parameter motor DC *shunt* berbeban yang digunakan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

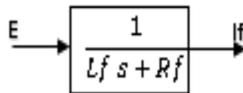
Tabel 3.1 Parameter Motor DC Shunt Berbeban [7]

Parameter	Satuan	Nilai
Tegangan Referensi (Vref)	Volt	12
Tahanan Jangkar (Ra)	Ω	0,71
Induktansi Jangkar (La)	mH	0,66
Tahanan Medan (Rf)	Ω	120
Induktansi Medan (Lf)	H	20
Konstanta Motor (Ktm)	N.m/A	$23 \cdot 10^{-3}$
Konstanta Tegangan Balik (Kgg)	Volt/rpm	$23 \cdot 10^{-3}$
Damper Motor (Bm)	N.m/rpm	$3,54 \cdot 10^{-6}$
Inersia Motor (Jm)	Kg.m ²	$7,06 \cdot 10^{-6}$
Damper Beban (Bl)	N.m/rpm	10^{-5}
Inersia Beban (Jl)	Kg.m ²	10^{-5}
Rasio gigi (n)	-	1

3.2.1 Model Matematis

Berikut ini akan ditampilkan rumusan dari masing-masing parameter dari bagian-bagian motor DC *shunt* berbeban,

a. Pada rangkaian medan



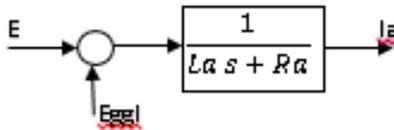
$$if = \frac{1}{Lf s + Rf} E$$

$$Lf \cdot \frac{dif}{dt} + Rf \cdot if = E$$

Persamaan differensial arus pada rangkaian medan sesuai Persamaan 3.1.

$$\frac{dif}{dt} = -\frac{Rf}{Lf}if + \frac{1}{Lf}E \dots\dots\dots(3.1)$$

b. Pada rangkaian jangkar



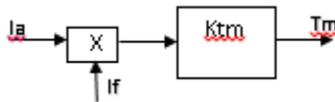
$$ia = \frac{1}{La s + Ra}(E - Eggl)$$

$$La \frac{dia}{dt} + Ra.ia = E - Eggl$$

Persamaan differensial arus pada rangkaian jangkar sesuai pada Persamaan 3.2.

$$\frac{dia}{dt} = -\frac{Ra}{La}ia + \frac{1}{La}E - \frac{1}{La}Eggl\dots\dots\dots(3.2)$$

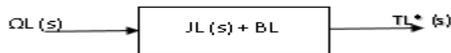
c. Torsi yang dibangkitkan



Besarnya torsi yang dibangkitkan oleh motor sesuai Persamaan 3.3

$$tm = Ktm.ia.if \dots\dots\dots(3.3)$$

d. Persamaan torsi pada beban

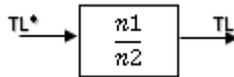


Besarnya kecepatan putar motor sesuai Persamaan 3.4.

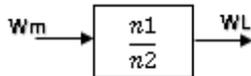
$$\Omega_m = \frac{1}{Jm.s} (\tau_m - \tau_L) \dots \dots \dots (3.4)$$

e. Roda gigi

Pada roda gigi akan dilihat besarnya torsi beban (Persamaan 3.5) dan hubungan antara kecepatan putar motor setelah pembebanan dengan rasio gigi (Persamaan 3.6).



$$\tau_L = \frac{n1}{n2} \tau_{L^*} \dots \dots \dots (3.5)$$



$$\Omega_m = \frac{n2}{n1} \Omega_L \dots \dots \dots (3.6)$$

Substitusi Persamaan (3.6) ke 3.4)

$$\frac{n1}{n2} \Omega_m = \frac{1}{Jm.s} (\tau_m - \tau_L)$$

Selisih antara torsi motor dengan torsi beban sesuai Persamaan 3.7.

$$\frac{n2}{n1} Jm \frac{d\Omega}{dt} + \frac{n2}{n1} Bm . \Omega L = \tau_m - \tau_L \dots \dots \dots (3.7)$$

$$\tau_L = \frac{n1}{n2} (Jl.s + BL)\Omega L$$

Besarnya torsi beban sesuai Persamaan 3.8.

$$\tau L = \frac{n1}{n2} J l \frac{d\Omega L}{dt} + \frac{n1}{n2} B l \cdot \Omega L \dots\dots\dots(3.8)$$

Substitusi Persamaan (7) ke (6)

$$\begin{aligned} \frac{n2}{n1} J m \frac{d\Omega L}{dt} + \frac{n2}{n1} B m \cdot \Omega L \\ = \tau m - \frac{n1}{n2} J l \frac{d\Omega L}{dt} - \frac{n1}{n2} B l \cdot \Omega L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau m = \frac{n2}{n1} J m \frac{d\Omega L}{dt} + \frac{n2}{n1} B m \cdot \Omega L + \frac{n1}{n2} J l \frac{d\Omega L}{dt} \\ - \frac{n1}{n2} B l \cdot \Omega L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau m = \frac{n2}{n1} J m \frac{d\Omega L}{dt} + \frac{n1}{n2} J l \frac{d\Omega L}{dt} + \frac{n2}{n1} B m \cdot \Omega L \\ - \frac{n1}{n2} B l \cdot \Omega L \end{aligned}$$

$$\tau m = \left(\frac{n2}{n1} J m + \frac{n1}{n2} J l \right) \frac{d\Omega L}{dt} + \left(\frac{n2}{n1} B m - \frac{n1}{n2} B l \right) \Omega L$$

$$\tau m = J t \frac{d\Omega L}{dt} + B t \Omega L$$

Persamaan differensial kecepatan motor berbeban sesuai Persamaan 3.9.

$$\frac{d\Omega L}{dt} = - \frac{B t \Omega L}{J t} + \frac{\tau m}{J t} \dots\dots\dots(3.9)$$

Substitusi Persamaan (3) ke (8) didapatkan persamaan differensial kecepatan motor berbeban dengan hubungannya dengan inersia total, damper total, konsanta motor , arus medan dan arus jangkar sesuai Persamaan 3.10.

$$\frac{d\Omega L}{dt} = - \frac{B t \cdot \Omega L}{J t} + \frac{1}{J t} K t m \cdot i a \cdot i f \dots\dots\dots(3.10)$$



$$Eggl = KggL \cdot if \cdot \Omega m$$

Hubungan antar beda tegangan dengan kecepatan motor berbeban sesuai Persamaan 3.11.

$$Eggl = KggL \cdot if \cdot \frac{n2}{n1} \Omega L \dots \dots \dots (3.11)$$

Substitusi Persamaan (3.11) ke (3.2) didapatkan persamaan differensial arus jangkar setelah pembebanan sesuai persamaan 3.12.

$$\frac{dia}{dt} = -\frac{Ra}{La} ia + \frac{1}{La} E - \frac{KggL}{La} \cdot \frac{n2}{n1} \cdot if \cdot \Omega \dots \dots \dots (3.12)$$

Maka persamaan *state* motor DC *shunt* berbeban adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{if} \\ \dot{ia} \\ \dot{\Omega l} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{Rf}{Lf} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Ra}{La} & -\frac{KggL}{La} \cdot \frac{n2}{n1} \cdot if \\ 0 & \frac{Ktm}{Jt} \cdot if & -\frac{Bt}{Jt} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} if \\ ia \\ \Omega l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{La} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

3.2 Perancangan *Sliding Mode Control* (SMC)

Pada perancangan SMC dapat kita bagi ke dalam dua bagian, yaitu perancangan permukaan luncur yang fungsinya untuk membatasi pergerakan trajektori agar selalu berada di sekitar permukaan luncur. Selanjutnya dilakukan perancangan sinyal kendali yang fungsinya memaksa trajektori status untuk menuju permukaan luncur dan setelahnya memelihara agar trajektori status selalu berada di sana.

3.2.1 Permukaan Luncur

Perancangan permukaan luncur menjadi hal yang terpenting dalam desain kontroler SMC. Karena pada saat perancangan permukaan luncur inilah diharapkan trajektori status dapat mengikuti tujuan yang diharapkan (trajektori menuju permukaan luncur).

Tujuan dari pengendalian motor DC ini adalah membuat keluaran mengikuti referensi yang diberikan dan perubahan kesalahan penjejakan terhadap waktu sama dengan nol. Sehingga untuk permukaan luncurnya dapat ditulis sesuai Persamaan 3.13.

$$\begin{aligned} \sigma(x) = s\dot{x} &= [s_1 \ s_2 \ s_3] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = [s_1 \ s_2 \ s_3] \begin{bmatrix} \ddot{e} \\ \dot{e} \\ e \end{bmatrix} \\ &= s_1\ddot{e} + s_2\dot{e} + s_3e \dots\dots\dots(3.13) \end{aligned}$$

di mana :

$$x_3 = e = \Omega r - \Omega L$$

$$x_2 = \dot{e} = \frac{de}{dt}$$

$$x_1 = \ddot{e} = \frac{de^2}{dt}$$

Misal dipilih $\tau_1 = 0,3 \text{ detik}$, $n = 5$

$$\tau_1 = 0,3 \text{ detik} , \tau_1 = 5. \tau_2, \text{ maka } \tau_2 = 0,06$$

$$\Omega = \frac{1}{(0,3.s+1)(0,06.s+1)} \Omega r$$

$$\Omega_L \equiv \Omega = \frac{1}{(0,3.s+1)(0,06.s+1)} \Omega r$$

$$\Omega r - \Omega_L = \Omega r - \frac{1}{(0,3.s+1)(0,06.s+1)} \Omega r$$

dengan $\Omega r - \Omega_L = e$ maka

$$e = \Omega r - \frac{1}{(0,3.s+1)(0,06.s+1)} \Omega r$$

$$e = \frac{(0,3.s+1)(0,06.s+1)-1}{(0,3.s+1)(0,06.s+1)} \Omega r$$

$$e = \frac{0,018.s^2+0,36.s+1-1}{0,018.s^2+0,36.s+1} \Omega r$$

$$e = \frac{0,018.s^2+0,36.s+1-1}{0,018.s^2+0,36.s+1} \Omega r$$

$$0,018.\ddot{e} + 0,36.\dot{e} + e = (0,018.s^2 + 0,36.s)\Omega r$$

Karena nilai Ωr konstan, maka nilai turunannya akan bernilai nol. Persamaan di atas dapat ditulis menjadi

$$0,018.\ddot{e} + 0,36.\dot{e} + e = 0$$

$$\sigma = 0,018.\ddot{e} + 0,36.\dot{e} + e = 0$$

$$s_1 = 0,018 ; s_2 = 0,36 ; s_3 = 1$$

3.2.2 Perancangan Sinyal Kendali

Secara umum kendali pada SMC dapat dipisah menjadi dua sinyal kendali yaitu u_{eq} dan u_n , dimana u_{eq} merupakan sinyal kendali ekuvalen yang akan membawa trajektori status ke permukaan luncur, sedangkan u_n merupakan sinyal kendali natural yang akan menjaga agar trajektori status tetap berada pada permukaan luncur.

$$u_{eq} = -(sB)^{-1} sAx$$

$$u_n = -k(sB)^{-1} sign(\sigma)$$

Sehingga persamaan sinyal kendali SMC dapat ditulis :

$$u(t) = -(sB)^{-1} sAx - k(sB)^{-1} sign(\sigma)$$

di mana :

s = koefisien permukaan luncur

k = penguatan penyaklaran

A = matrik status

B = matrik masukan

$x = \text{variable status}$

$\sigma = \text{persamaan permukaan luncur}$

Dimisalkan :

$$x_1 = if; x_2 = ia; x_3 = \Omega L \text{ dan } E = u$$

$$\dot{x}_1 = \dot{if} = -\frac{Rf}{Lf}if + \frac{1}{Lf}E$$

Persamaan *state* dari i_f sesuai Persamaan 3.14.

$$\dot{x}_1 = -\frac{Rf}{Lf}x_1 + \frac{1}{Lf}u \dots \dots \dots (3.14)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{ia} = -\frac{Ra}{La}ia + \frac{1}{La}E - \frac{1}{La}Eggl$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{Ra}{La}x_2 + \frac{1}{La}u - \frac{1}{La}Eggl$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{Ra}{La}x_2 + \frac{1}{La}u - \frac{1}{La}Kggl \cdot if \cdot \frac{n_2}{n_1}\Omega L$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{Ra}{La}x_2 + \frac{1}{La}u - \frac{1}{La}Kggl \cdot x_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}x_3$$

Persamaan *state* dari i_a sesuai Persamaan 3.15.

$$\dot{x}_2 = -\frac{Ra}{La}x_2 - \frac{Kggl}{La} \cdot \frac{n_2}{n_1}x_1 \cdot x_3 + \frac{1}{La}u \dots \dots \dots (3.15)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\Omega L} = -\frac{Bt \cdot \Omega L}{Jt} + \frac{1}{Jt}Ktm \cdot ia \cdot if$$

Persamaan *state* dari ΩL sesuai Persamaan 3.16

$$\dot{x}_3 = -\frac{Bt}{Jt}x_3 + \frac{1}{Jt}Ktm \cdot x_1 \cdot x_2 \dots \dots \dots (3.16)$$

Maka persamaan *state* sistem adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{Rf}{Lf} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Ra}{La} & -\frac{KggL}{La} \cdot \frac{n2}{n1} x_1 \\ 0 & \frac{Ktm}{Jt} x_1 & -\frac{Bt}{Jt} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{La} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

Persamaan *state space* :

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t)$$

di mana:

$$x = \text{variable status} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} if \\ ia \\ \Omega L \end{bmatrix}$$

$$A = \text{matrik status} = \begin{pmatrix} -\frac{Rf}{Lf} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Ra}{La} & -\frac{KggL}{La} \cdot \frac{n2}{n1} x_1 \\ 0 & \frac{Ktm}{Jt} x_1 & -\frac{Bt}{Jt} \end{pmatrix}$$

$$B = \text{matrik masukan} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{La} \\ 0 \end{bmatrix}$$

u = sinyal kontrol

dengan memasukkan nilai pada Tabel 3.1 maka didapatkan:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{120}{20} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{0,71}{0,00066} & -\frac{1,38}{0,00066} \cdot 1 \cdot x_1 \\ 0 & \frac{0,023}{(0,00000706+0,00001)} x_1 & -\frac{0,0002124+0,0006}{(0,00000706+0,00001)} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} -6 & 0 & 0 \\ 0 & -1075,7576 & -6497,1751x1 \\ 0 & 1348,1829x1 & -47,6202 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{20} \\ 1 \\ 0,00066 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,05 \\ 1515,152 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Perancangan sinyal kendali :

Kontrol ekivalen : $ueq = -(sB)^{-1}sAx$

$$ueq = - \left([0,018 \quad 0,36 \quad 1] \begin{bmatrix} 0,05 \\ 1515,152 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} [0,018 \quad 0,36 \quad 1] \cdot \begin{pmatrix} -6 & 0 & 0 \\ 0 & -1075,7576 & -6497,1751x1 \\ 0 & 1348,1829x1 & -47,6202 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix}$$

$$ueq = -(0,0009 + 545,455 + 0)^{-1} \cdot [-0,108 \quad -387,273 + 1348,182x1 \quad 6497,175x1 - 47,62] \cdot \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix}$$

$$ueq = -1,833 * 10^{-3}(-0,108x1 - 387,273x2 + 1348,182 + 6497,175 \cdot x1 \cdot x3 - 47,62x3)$$

$$ueq = 0,198 * 10^{-3}x1 + 0,7099x2 - 2,4712x1x2 - 11,9093x1x3 + 0,08729x3$$

Kontrol natural : $un = -k(sB)^{-1}sign(\sigma)$

$$un = -k(1,833 \cdot 10^{-3}) \cdot sign(0,018 \cdot \ddot{e} + 0,36 \cdot \dot{e} + e)$$

$$un = -k(1,833 * 10^{-3}) \cdot sign \left(0,018 \frac{ds^2}{dt} e + 0,36 \frac{ds}{dt} e + e \right)$$

Sinyal kontrol : $u(t) = ueq + un$

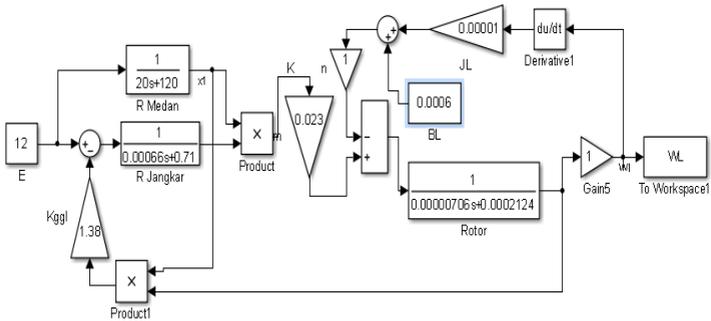
$$u(t) = 0,198 * 10^{-3}x_1 + 0,7099x_2 - 2,4712x_1x_2 - 11,9093 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,08729x_3 - k(1,833 * 10^{-3})\text{sign}\left(0,018\frac{ds^2}{dt}e + 0,36\frac{ds}{dt}e + e\right)$$

BAB IV SIMULASI dan ANALISA

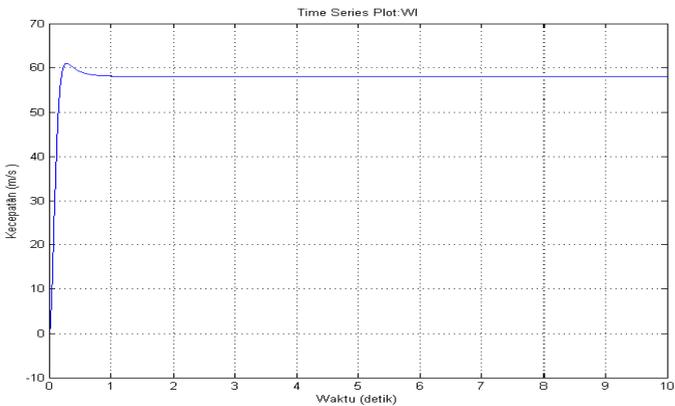
Dari hasil perancangan sistem akan dibuat sebuah model simulasi menggunakan Simulink Matlab.

4.1 Motor DC *Shunt* Berbeban

Dari Gambar 3.1 dan Tabel 3.1 dilakukan simulasi dengan Matlab seperti pada Gambar 4.1. Hasil dari simulasi (WL) adalah Gambar 4.2

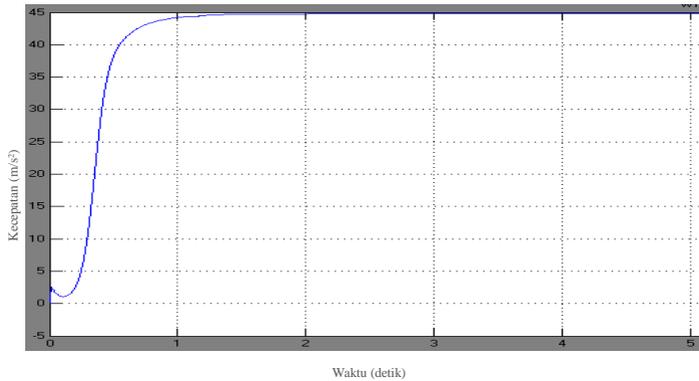


Gambar 4.1 Simulink Motor DC *Shunt* Berbeban



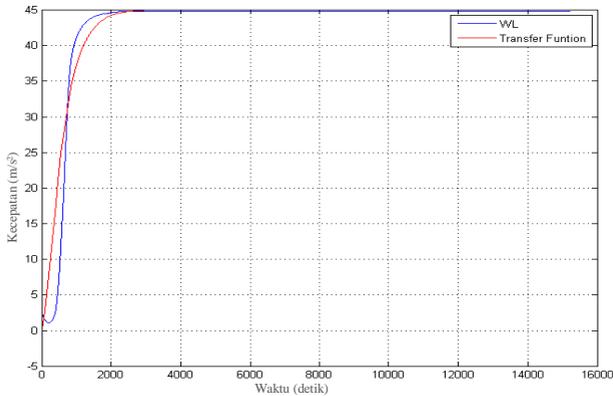
Gambar 4.2 Respon Kecepatan

Dari nilai permukaan luncur yang diberikan yaitu $\frac{1}{0,3 s+1} x \frac{1}{0,06 s+1}$, *time* konstan $t = 0,3$, sesuai dengan nilai *pole dominant*. Pada Gambar 4.4, terlihat bahwa sistem mencapai 0,632 dari 45 (nilai kecepatan saat mencapai *steady state*) yaitu 28,4 pada saat $t = 0,3$. Berdasarkan hal ini dapat dikatakan bahwa respon sistem mengikuti permukaan luncur yang diberikan.



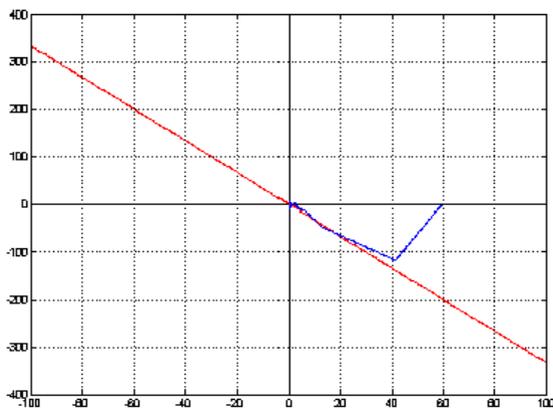
Gambar 4.4 Respon Kecepatan Setelah Diberi Kontroler

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.5.



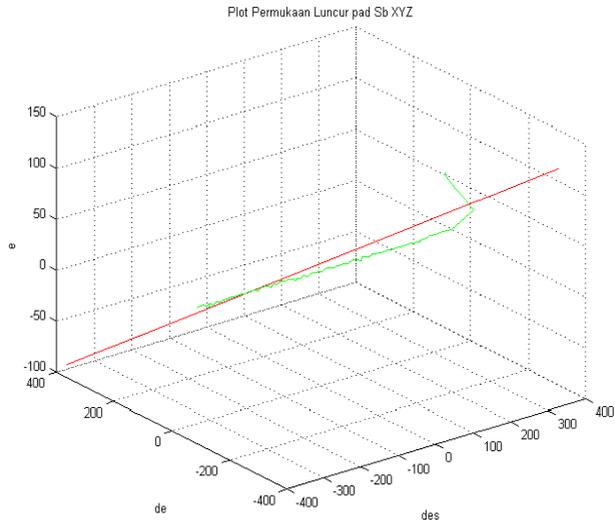
Gambar 4.5 Respon Kecepatan dengan Permukaan Luncur

Pada Gambar 4.5 dibandingkan antara respon kecepatan (garis biru) terhadap permukaan luncur (garis merah) dengan nilai $\left(\frac{1}{0,018s+0,36s+1}\right)$. Respon kecepatan mengikuti respon permukaan luncur yang dirancang.



Gambar 4.6 Perubahan Nilai *Error* dengan Permukaan Luncur pada Sb XY

Nilai kecepatan (garis biru) bergerak dari *initial condition* menuju permukaan luncur (garis merah), dan tetap dipertahankan di sana pada waktu selanjutnya. Pada Gambar 4.7 akan ditunjukkan pergerakan kecepatan dari *initial condition* menuju permukaan luncur pada sumbu XYZ. Pergerakan nilai *error* pada Gambar 4.6 merupakan garis melengkung, ini sesuai Gambar 4.4, yang merupakan respon kecepatan setelah diberi kontroler.



Gambar 4.7 Perubahan Nilai *Error* dengan Permukaan Luncur pada Sb XYZ

Garis merah adalah permukaan luncur dan garis hijau nilai dari respon kecepatan terhadap waktu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Respon sistem mengikuti rancangan permukaan luncur yang dibuat sesuai *pole dominant* $\tau_1 = 0,3$.
2. Nilai *error* dari sistem meluncur dari keadaan awal menuju permukaan luncur.
3. Setelah mencapai permukaan luncur, nilai *error* sistem dipertahankan tetap berada disana samapai waktu berikutnya.
4. Pergerakan nilai *error* sistem dari keadaan awal menuju permukaan luncur menyerupai gerak respon sistem

Untuk pengembangan selanjutnya, dapat dilihat pengaruh perubahan nilai penguatan (k) pada respon sistem.

Halaman ini sengaja dokoongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Daryanto, **Sistem Kelistrikan Motor**, Bandung : PT. Sarana Tutorial , Nurani Sejahtera, 2011.
- [2] Triwiyatno, Dr. Aris, ST.,MT., **Buku Ajar Sistem Kontrol Analog**,
<URL:<http://aristriwiyatno.blog.undip.ac.id/files/2011/10/Bab-1-Konsep-Umum-Sistem-Kontrol.pdf>>, diakses pada 2 April 2014 pukul 10.00 WIB.
- [3] Soge, Tian M, Samuel Saut, Davin Mahdi Ansory, H. Lismanto, Nahdiatul Ursi'ah, Ambar Jati W, Andri Setya D., Chairul Arifin, Nandhini D.N., **Sistem Kontrol Robust**,
<URL:<http://www.scribd.com/doc/118222629/Kelompok-1-Sistem-Kontrol-Robust>>, diakses pada 3 April 2014 pukul 12.00 WIB.
- [4] Dodi, **Sistem Kontrol Elektronika**,
<URL:http://www.reocities.com/al_dodi/kerja/kp3.pdf>, diakses pada 5 April 2014 pukul 19.00 WIB.
- [5] Pinem, Andreas, Pengaturan Kecepatan Motor DC Penguatan Shunt dengan Integral Siklus Kontrol, **Tugas Akhir**, Teknik Elektro, Medan : Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [6] Liu, Jinkun, Xinhua Wang, **Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems**, Beijing : Tsinghua University Press, 2012.
- [7] Nabila, Desain Kontroler untuk Pengaturan Posisi pada Motor DC Shunt Menggunakan Analisis Kestabilan Positive Real, **Tugas Akhir**, Teknik Elektro, Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh November, 2011 .

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Oka Gunanta Ginting dilahirkan di Balige, 25 Maret 1988. Penulis adalah putra dari pasangan M. Ginting dan R. Sebayang. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD Swasta Budhi Dharma Balige, SMPN 4 Soposurung Balige, SMP Swasta Budhi Dharma Soposurung Balige, serta SMAN 2 Soposurung Balige hingga lulus tahun 2006. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh

Nopember Surabaya pada Jurusan Teknik Elektro, dan kemudian mengambil bidang studi Teknik Sistem Pengaturan.

Halaman ini sengaja dikosongkan