

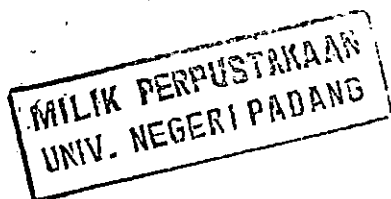
DASAR SISTEM PENGATURAN



MILIK PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
TERIMA TGL. :	4-1-2000
SUMBER/HARGA :	Hd
KOLEKSI :	KI
NO. INVENTARIS :	2455/KI/2000-d ₂ (38)
KLASIFIKASI :	621.317 Rid d

Oleh :

Drs. Ridwan, M.Sc.Ed



Editor :

1. Drs. Zakir Yahya
2. Drs. Ahyanuardi, MT

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG**

DIP Universitas Negeri Padang

Nomor : 071/XXIII/008/4/-/1999

Tanggal : 1 April 1999

KATA PENGANTAR

Buku ajar ini dipersiapkan untuk para mahasiswa/pengajar sistem Pengaturan di Jurusan Teknik Elektro F.T. UNP Padang, yang memiliki program studi S1 Pendidikan Teknik Elektro dan D 3 Teknik Elektro. Isinya terdiri dari bahan-bahan ajar yang dikumpulkan dari berbagai sumber terutama buku-buku yang berbahasa Inggris.

Mengingat pentingnya arti sistem Pengaturan bagi mahasiswa, maka penulis mencoba membahas buku ini dalam 8 Bab, yang meliputi pentingnya arti sistem Pengaturan, Jenis-jenis, komponen dan pemodelan sistem, transformasi Laplace. Performansi sistem, kestabilan sistem, tempat kedudukan akar-akar dan Analisis Frekuensi respons dengan diagram Nyquist dan diagram Bode. Penulisan buku ini didasarkan atas kebutuhan silabus pada kurikulum jurusan Teknik Elektro FT UNP Padang.

Di dalam buku ini terkandung cukup banyak teori dan soal-soal yang memadai untuk mendalami bidang pengaturan. Sangat diharapkan setelah mempelajari buku ini, mahasiswa dapat melakukan percobaan di Laboratorium pengaturan. Kepada para pengajar diharapkan pula dapat memberikan penjelasan tambahan secara verbal untuk lebih menjelaskan materi-materi yang lebih luas.

Penulis menyadari bahwa beberapa istilah (terjemahan) dalam buku ini belum memenuhi bahasa Indonesia baku dan masih terdapat kekurangan dalam buku ini. Oleh sebab itu, tegur sapa dan kritikan dari pembaca sangat diharapkan demi penyempurnaan isi buku ini. Selanjutnya penulis menyampaikan terima kasih kepada pimpinan proyek P2T UNP dan Dekan FT UNP yang telah memberikan kepercayaan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan buku ajar ini.

Akhirnya, penulis juga mengucapkan terima kasih, kepada Drs. Zakir Yahya dan Drs. Ahyanuardi, M.T. yang telah meluangkan waktu untuk mengedit dan memeriksa isi buku ini, sehingga dapat diterbitkan.

Padang, 29 Februari 2000

Penulis.

DAFTAR ISI

	Halaman
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
BAB I PENGERTIAN SISTEM PENGATURAN	
Tujuan	1
1.1. Sejarah Perkembangan Sistem Pengaturan	2
1.2. Definisi-definisi dalam sistem Pengaturan	3
1.3. Pengelompokan Sistem	4
Kesimpulan	10
Bahan Bacaan	11
Soal-Soal latihan	12
BAB II ELEMEN SISTEM PENGATURAN	
Tujuan	13
2.1. Transduser	13
2.1.1. Potensiometer	14
2.1.2. Elemen Sinkro	17
2.1.3. LVDT	19
2.1.4. Tachogenerator	21
2.1.5. Strain Gauge	23
2.2. Penggerak	27
2.2.1. Generator	27
2.2.2. Generator Medan Lintang	27
2.2.3. Motor	29
2.2.3.1. Motor DC	30
2.2.3.2 Motor AC	31
2.2.2.3. Motor Servo	31
2.2.4. Roda Gigi	33
2.3. Penguat	34
2.3.1. Magnetik Amplifier	34

	Kesimpulan	37
	Bahan Bacaan	37
	Soal-Soal Latihan	38
BAB III	TRANSFORMASI LAPLACE	
	Tujuan	40
	3.1. Transformasi Laplace Sederhana	40
	3.2. Ciri-ciri Transformasi Laplace	41
	3.3. Transformasi Laplace Balik	43
	3.4. Penerapan Transformasi Laplace	44
	Kesimpulan	47
	Bahan Bacaan	47
	Soal-Soal Latihan	48
BAB IV	MODEL MATEMATIKA SISTEM FISIK	
	Tujuan	49
	4.1. Fungsi Alih	50
	4.2. Diagram Blok	55
	4.3. Diagram Aliran Signal (GAS)	60
	Kesimpulan	63
	Bahan Bacaan	63
	Soal-Soal Latihan	64
BAB V	PERFORMANSI SISTEM	
	Tujuan	65
	5.1. Respons Sistem	65
	5.2. Macam-macam peredaman	67
	5.3. Pembahasan Transistem	68
	5.4. Respons terhadap input sinusoida	70
	5.5. Peredaman	71
	5.5.1. Feedback Kecepatan	72
	5.5.2. Nilai Kesalahan	73
	5.5.3. Kendali Integral	74

3. Kunci Jawaban Soal-Soal Latihan

2. Tabel Data Lingkaran M dan N

1. Tabel Transformasi Laplace

Soal-Soal Latihan 114

Bahan Bacaan 113

Kesimpulan 113

8.3. Kompensasi 112

8.2. Bode-plot 105

8.1. Kriteria Kestabilan Nyquist 95

Tujuan 95

METODE FREKUENSI RESPONS

BAB VIII

Soal-Soal Latihan 94

Bahan Bacaan 94

Kesimpulan 93

7.3. Parameter dalam Sistem Pengaturan 89

7.2. Abstrak Menggambarkan Tempat Kedudukan Akar-Akar 85

7.1. Metode Root Locus (TKA) 85

Tujuan 85

TEMPAT KEDUDUKAN AKAR-AKAR

BAB VII

Soal-Soal Latihan 84

Bahan Bacaan 83

Kesimpulan 83

6.2. Kriteria Kestabilan Routh 80

6.1. Persamaan Karakteristik 76

Tujuan 76

KESTABILAN SISTEM

BAB VI

Soal-Soal Latihan 75

Bahan Bacaan 75

Kesimpulan 74

BAB I PENGERTIAN SISTEM PENGATURAN

Keinginan manusia mengelola sumber daya alam menciptakan kemajuan bagi kehidupannya. Tujuannya yaitu memudahkan pekerjaan fisik yang jauh dari kemampuan yang dimiliki. Selama abad ke 20 telah banyak diciptakan kemajuan teknologi yang membawa impian menjadi kenyataan bagi umat manusia. Salah satu dari faktor yang penting untuk kemajuan itu adalah pengembangan sistem pengaturan di industri-industri.

Pada awalnya orang menggunakan tenaga angin dan air sebagai penggerak, misalnya untuk penggilingan. Sejak ditemukan mesin uap pada abad 18 oleh James Watt, orang telah memanfaatkan tenaga uap sebagai penggerak mesin disamping batubara sebagai sumber energi untuk pemanasan di industri. Demikian pula bahan bakar dimanfaatkan lebih baik lagi dalam bidang transportasi. Energi listrik lebih berperan dalam perkembangan industri produksi dan informasi. Energi listrik ini dibangkitkan dengan tenaga air, uap, solar cell dan nuklir. Dengan pemanfaatan energi listrik ini, perkembangan industri maju lebih pesat lagi. Dalam hal ini orang/para industriawan haruslah dapat memahami, mengatur dan mengendalikan lingkungan untuk menghasilkan produk yang lebih bernilai ekonomis bagi masyarakat. Pengaturan ini disebut dengan pengaturan sistem.

Didalam proses industri sangat diperlukan kondisi atau persyaratan yang khusus seperti ketelitian yang tinggi, harga yang konstan untuk selang waktu tertentu, harga yang bervariasi dalam suatu rangkaian tertentu. Dengan alasan inilah perlu suatu konsep pengaturan yang dikenal dengan sistem pengaturan atau sistem kontrol.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini .anda dapat :

1. Menerangkan tujuan sistem pengaturan
2. Menggambarkan diagram blok sistem pengaturan lup tertutup dan lup terbuka dengan contoh pemakaian dalam kehidupan sehari-hari.
3. Menjelaskan perbedaan macam-macam sistem pengaturan menurut fungsinya.

Sistem pengaturan tidak terbatas hanya pada satu bidang disiplin keteknikan saja, melainkan juga berlaku untuk disiplin lainnya, misalnya listrik, mekanik, kedirgantaraan, kimia nuklir bahkan pada bidang ilmu ekonomi dan manajemen. Sistem pengaturan dapat didefinisikan sebagai alat yang mengatur aliran energi, benda atau sumber /resources lain yang penampilan, kompleksitas dan pengaturannya bervariasi berdasarkan fungsi dan tujuan yang diinginkan.

Menurut Dorf (1983) sistem pengaturan adalah hubungan timbal balik antara komponen-komponen yang membentuk suatu konfigurasi sistem yang memberikan suatu hasil yang dikehendaki

1.1. Sejarah Perkembangan Sistem Pengaturan

Sistem pengaturan mengalami kemajuan berdasarkan kebutuhan dan fungsinya. Semakin banyak komponen yang dilibatkan, semakin rumit sistem tsb. Berdasarkan pengembangannya, sistem yang lebih baik adalah sistem yang berumpun balik karena sistem ini cenderung mempertahankan hubungan yang telah ditentukan sebelumnya dengan hasil yang dicapai sistem. Sistem ini dibuat kira-kira 300 tahun SM di Yunani. Misalnya, sistem pengaturan ketinggian air dengan pelampung. Regulator pelampung ini terus dikembangkan oleh Philon, Heron, dan Alexandria yang menerbitkan buku dengan judul *Pneumatica*. Kemudian pada tahun 1681 ditemukan pengaturan tekanan untuk pembangkit uap. Pengaturan berumpan balik yang penting pertama kali dibuat oleh James Watt pada abad ke 18.

Pada tahun 1922 Minersky membuat pengatur otomatis untuk pengemudian kapal untuk menentukan kestabilan dengan persamaan differensial yang melukiskan sistem. Pada tahun 1932, Nyquist mengembangkan suatu prosedur yang relatif sederhana untuk menentukan kestabilan sistem lup tertutup pada dasar respons lup terbuka terhadap masukan tunak (Steady state) sinusoida.

Pada tahun 1934, Hazen memperkenalkan istilah servomekanisme untuk sistem kontrol posisi, membahas desain servomekanisme dengan nilai masukan yang berubah. Setelah perang dunia kedua, didorong oleh keperluan perancang pesawat berpilot otomatis, sistem pengarah senjata, sistem pengaturan antena radar dan keperluan lain yang berhubungan dengan kebutuhan militer, maka metode

matematis dan analitis bertambah jumlah dan daya gunanya. Tambahan pula dengan bertambahnya penggunaan transformasi Laplace dan bidang frekuensi kompleks, teknik pengaturan terletak pada penggunaan metode bidang s , terutama pendekatan tempat kedudukan akar-akar (Root Locus). Dengan bantuan komputer, elektronik analog digital maka pengaturan tidak lagi membicarakan masukan satu keluaran, tetapi dapat melibatkan pengaturan banyak variabel yang harus diatur secara lebih praktis dan umum.

Dengan perkembangan ini, akan mempercepat lahirnya Teori Pengaturan Optimal yang dikembangkan oleh LS Poutryagin dari Uni Sovyet dan R Bellman dari Amerika. Dalam sistem pengaturan optimal ini tampak suatu gejala bahwa wawasan waktu dan frekuensi sama-sama digunakan secara serentak untuk menganalisa sistem.

1.2. Definisi-definisi dalam Sistem Pengaturan.

Sebelum membicarakan jenis-jenis sistem pengaturan, ada baiknya dilihat beberapa istilah yang biasa ditemui dalam sistem sebagai berikut :

- a. Sistem adalah gabungan beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan mempunyai tujuan tertentu.
- b. Proses adalah suatu operasi atau serangkaian operasi yang berlangsung secara kontinu, terdiri dari beberapa aksi atau perubahan yang dikontrol, diarahkan secara sistematis menuju ke suatu hasil.
- c. Plant adalah seprangkat alat atau fasilitas yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu sehingga proses terlaksana.
- d. Gangguan adalah suatu signal yang cenderung mempengaruhi nilai output sistem. Gangguan ini mungkin datang dari dalam atau dari luar sistem tergantung dari mana gangguan itu dibangkitkan.
- e. Kontrol berumpan balik (feedback control) adalah suatu operasi dengan adanya gangguan yang cenderung memperkecil selisih antara nilai output dan input referensi (suatu keadaan yang diinginkan, diubah secara sembarangan). Perbedaan ini digunakan untuk mengubah output untuk mengurangi pengaruh gangguan. Umumnya, bila mungkin kompensasi

dilakukan untuk setiap gangguan yang diramalkan sehingga gangguan yang tak teramalkan saja yang mempengaruhi output.

- f. Sistem kontrol berumpan balik adalah sebuah sistem yang cenderung menjaga hubungan antara input acuan dan output sistem dengan membandingkan kedua signal dan memanfaatkan perbedaan tersebut sebagai tujuan pengaturan.
- g. Servomekanisme adalah salah satu dari jenis sistem pengaturan berumpan balik yang outputnya berupa posisi, kecepatan atau percepatan mekanik servomekanisme banyak dipakai pada industri modern. Contoh : pengaturan posisi pada penggulangan atau operasi mesin otomatis perkakas , bersama-sama dengan instruksi yang telah diprogramkan terlebih dahulu.
- h. Sistem regulator otomatis adalah sistem pengontrol berumpan balik yang input acuan atau output yang diinginkan adalah komponen tetap atau mengalami perubahan sangat lambat terhadap waktu, dan tugas utamanya adalah menjaga output pada nilai yang diinginkan dalam keadaan ada gangguan. Misalnya pemanas ruangan dengan termostat.
- i. Sistem pengontrolan proses adalah sistem regulator otomatis dengan output berubah menurut suhu, tekanan , aliran atau ketinggian cairan. Pengaturan dengan program untuk ubahan outputnya dilakukan sebelumnya dalam sistem.

1.3. Pengelompokan Sistem

Tujuan utama suatu sistem pengaturan ialah untuk mendapatkan optimasi yang diperoleh berdasarkan fungsi dari sistem tersebut. Pengelompokan sistem pengaturan dapat dipandang dari segi peralatan, blok diagram dan jenis pengaturannya. Secara umum, kontrol sistem dapat dikelompokkan sbb. (S: Pakpahan, 1987)

a. Manual dan Otomatis

Sesuai dengan artinya, sistem pengaturan manual selalu dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator. Contohnya, pengaturan aliran air melalui keran, pengaturan kecepatan kendaraan dan pengaturan suhu ruangan dan lain-lain. Pengaturan otomatis dilakukan oleh mesin-mesin/peralatan yang bekerja secara otomatis walaupun operasinya masih diawasi oleh manusia. Pengaturan ini banyak dilakukan di industri-industri seperti pengaturan aliran, suhu dan tekanan menggunakan katup pengatur/pengontrolan suhu ruangan oleh bimetal atau thermostat.

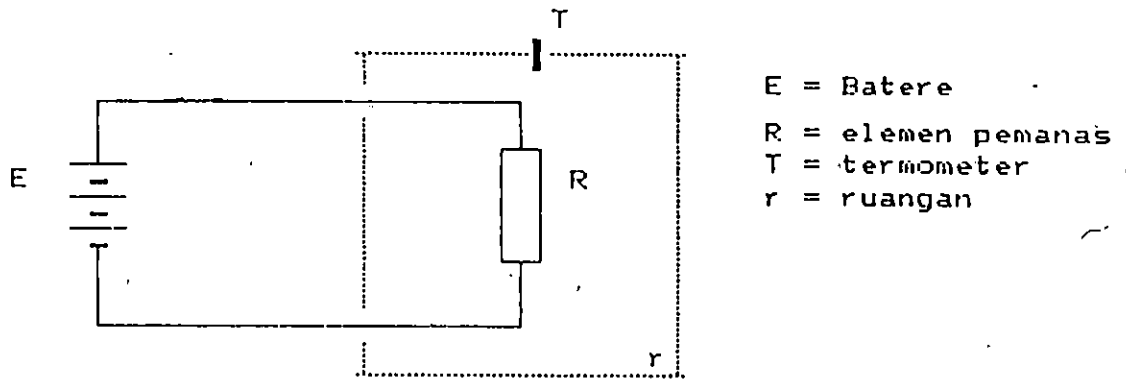
b. Sistem pengaturan lup terbuka

Sistem pengaturan lup terbuka adalah pengaturan dimana outputnya tidak memberi pengaruh terhadap aksi pengaturan, sehingga output tidak dapat dibandingkan dengan input. Sistem pengaturan lup terbuka dapat memberikan pengaturan output yang baik, apabila hubungan antara input dan output benar dengan diketahui dan tidak terjadi gangguan yang berarti pada sistem. Dasar untuk menganalisa suatu sistem adalah landasan yang diberikan oleh sistem linear yang menganggap adanya hubungan linear antara sebab dan akibat suatu sistem. Karena itu, komponen atau proses yang akan diatur digambarkan dalam bentuk diagram blok. Untuk sistem lup terbuka, pengaturannya dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar. 1.1 . Diagram sistem pengaturan terbuka

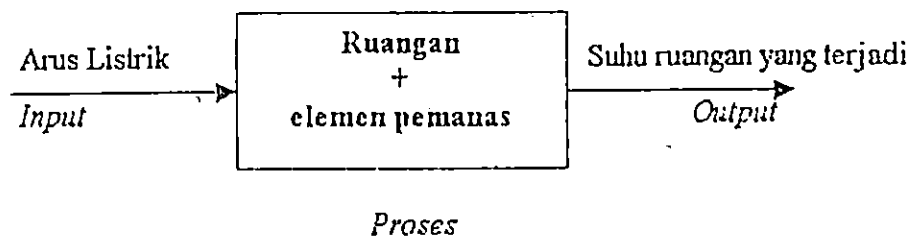
Sebagai contoh dari sebuah sistem pengaturan lup terbuka, Berikut ini diberikan contoh pengaturan suhu ruangan dengan rangkaian seperti pada gambar 1.2.



E = Baterie
 R = elemen pemanas
 T = termometer
 r = ruangan

Gambar 1.2. Rangkaian listrik pemanas ruangan

Sebuah ruangan akan dipanasi dengan sebuah elemen pemanas. Besaran arus listrik yang mengalir pada elemen sangat tergantung dari besarnya sumber listrik dan besarnya daya elemen. Semakin besar daya arus listrik yang diserapnya semakin banyak panas yang dihasilkan. Lama kelamaan ruangan menjadi panas dan suhu ruangan naik. Suhu ruangan ini dapat diketahui dengan membaca penunjukkan termometer. Jika tidak ada alat atau orang yang dapat merasakan panas yang terjadi maka panas ruangan tidak dapat dimonitor atau dikontrol untuk mendapatkan suhu seperti yang diinginkan. Dari contoh ini, nampak bahwa output atau panas ruangan tidak memberikan pengaruhnya terhadap input (besaran sumber arus listrik), maka sistem ini disebut sistem pengatur lup terbuka. Tambahan pula, apabila terjadi kerugian pada dinding ruangan dan suhu ruangan akan berubah pula dan perubahan ini tidak dapat dikontrol dan diperbaiki. Secara blok diagram sistem diatas dapat digambarkan sbb. :



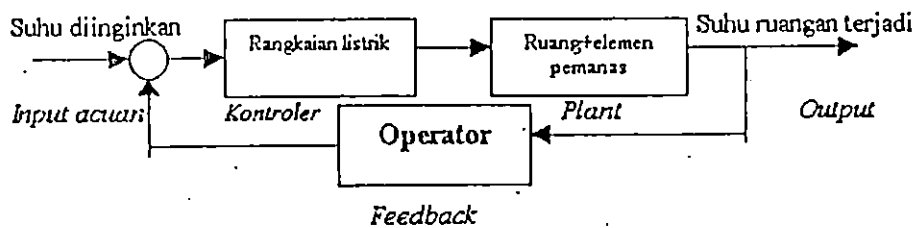
Gambar 1.3. Blok diagram sistem pemanas ruangan lup terbuka

Jadi sebagai input sistem ini ialah arus listrik, sebagai plant yaitu bahagian dikontrol dan mengontrol adalah elemen pemanas dan ruangan dan

sebagai output sistem adalah panas ruangan yang terjadi. Selanjutnya apabila kondisi pada sistem pengaturan lup terbuka seperti gambar diatas ditambah dengan sebuah saklar dan operator yang dapat merasakan dan melakukan perbaikan agar tercapai panas ruangan yang diinginkan, maka sistem ini akan lebih baik dari pada sistem pengaturan lup terbuka.

Katakanlah suhu ruangan yang diinginkan 25°C . Dengan menutup saklar maka arus listrik mengalir pada elemen panas dan rangkaian listrik. Tugas operator setiap saat mengamati skala termometer yang ada di ruangan. Apabila suhu ruangan melebihi 25°C saklar segera dibuka. Suhu ruangan akan turun dan operator menutup saklar kembali dan suhu ruangan menjadi naik. Demikianlah terus menerus yang dilakukan oleh operator untuk menjaga suhu tetap pada 25°C . Dengan kata lain, tugas operator mengembalikan hasil output ke dirinya sendiri agar dapat membandingkan dengan hasil yang diinginkan dengan cara mematikan dan menghidupkan saklar berdasarkan tampilan termometer.

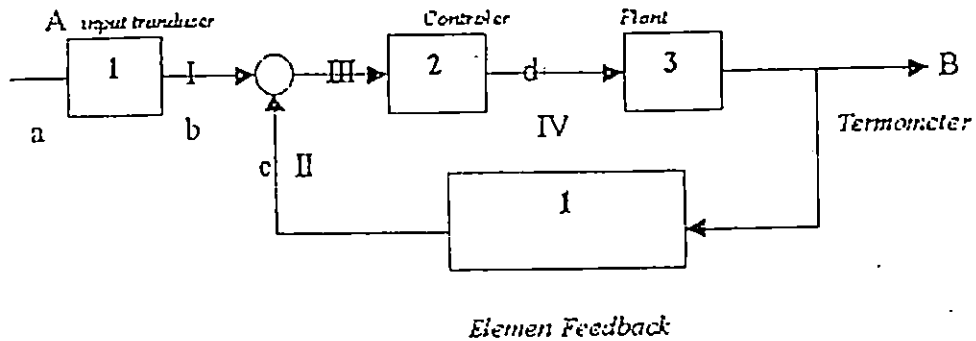
Kontrol yang dilakukan operator berdasarkan atas penyimpangan suhu dari pengukuran dan kecepatan melakukan perbaikan. Jadi disini terjadi proses pengembalian keluaran ke masukan. Sistem ini disebut sistem pengaturan lup tertutup. Karena outputnya difeedbackkan ke input, maka sistem disebut dengan sistem pengaturan feedback. Seandainya operator bukan bagian dari sistem, sistem ini dianggap sistem pengaturan lup terbuka. Blok diagram sistem ini digambarkan sbb. :



Gambar 1.4. Blok diagram sistem pemanas ruangan lup tertutup.

Pada Sistem pengaturan lup tertutup, operator berperan sebagai komponen feedback. Namun tenaga manusia tidak dapat menjamin ketelitian pengukuran dan pengaturan terhadap output yang diinginkan. Untuk itu, dipergunakan alat yang mempunyai kecepatan dan presisi yang tinggi dan

bekerja secara otomatis. Penggunaan alat ini pada sistem lup tertutup disebut Sistem pengaturan otomatis. Pada contoh diatas, operator diganti dengan bimetal, sehingga blok diagram sistem pengaturan tersebut seperti gambar 1.5 dibawah ini.



Keterangan :

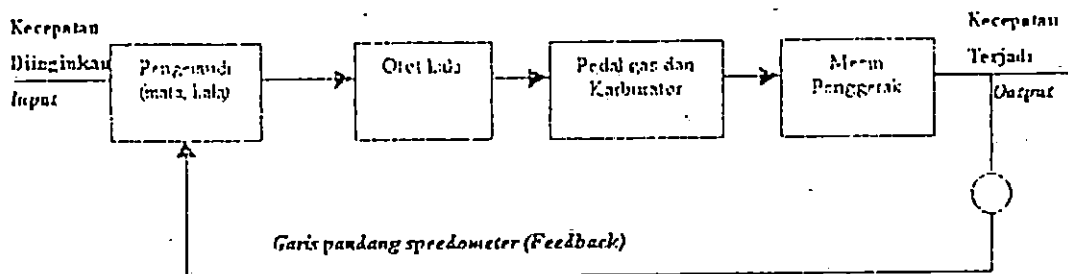
- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| A : Suhu yang diinginkan | c : Output |
| B : Suhu yang terjadi | I, II, III : posisi kontak |
| a : Input komando | IV : arus listrik |
| b : Input referensi | 1 : switch bimetal |
| c : sinyal pengatur | 2 : rangkaian listrik |
| | 3 : ruangan dan elemen pemanas. |

Gambar 1.5. Blok diagram sistem pemanas ruangan lup tertutup otomatis.

Pertama-tama switch bimetal dikalibrasi dengan penetapan suhu yang diinginkan pada output, misalnya 25° C. Apabila suhu ruangan melebihi 25° C, bimetal akan membuka dan sebaliknya bila suhu kurang dari 25° C, bimetal akan menutup. Karena posisi kontak bimetal telah diset sebelumnya, maka ia akan bekerja dengan sendirinya. Dalam sistem ini akan ada input referensi dan input command. Input referensi ini bersama-sama dengan sinyal feedback akan menghasilkan sinyal penggerak (sinyal kesalahan). Sinyal kesalahan ini menjadi input bagi pengatur (kontroller) dan menghasilkan input pada proses yang disebut dengan sinyal pengatur. Demikian pula signal feedback yaitu signal yang memfeedbackkan output ke input.

Contoh lain dari sistem pengaturan yang biasa ditemukan dalam kehidupan sehari-hari adalah sistem pengemudi mobil. Dalam sistem ini, yang diatur adalah kecepatan dan percepatan mobil. Agar tercapai kecepatan yang diinginkan, maka pengemudi selama menjalankan mobil haruslah memperhatikan kondisi jalan raya dan mengatur alat-alat mobilnya seperti stir, rem, pegas dan mengatur kecepatan yang diinginkan yang ditunjukkan oleh speedometer. Misalnya, pengemudi ingin kecepatan tetap pada 50 km/jam, ia akan menekan pedal akselator (pegas) sampai kecepatan yang diinginkan tercapai, kemudian mempertahankan posisi pedal tsb., kecepatan mobil tidak akan berubah, bila tidak ada perubahan atau gangguan-gangguan sepanjang perjalanan.

Kecepatan mobil ditunjukkan oleh speedometer. Pengemudi selalu memperhatikan penunjukan dan membandingkannya dengan kecepatan yang diinginkan dengan jalan menambah dan menurunkan kecepatannya yaitu dengan mengubah-ubah tekanan pedal akselator oleh gerakan kaki. Proses pengaturan ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1.6. Sistem pengaturan kecepatan mobil

Dari uraian diatas dapat ditentukan ciri-ciri dari kedua sistem sebagai berikut :

a. Sistem Pengaturan Lup terbuka

1. Konstruksi sederhana dan perawatannya mudah.
2. Akurasi ditentukan oleh kalibrasi elemen kontrol.
3. Tidak ada persoalan kestabilan.
4. Cocok untuk output yang sukar diukur.

b. Sistem pengaturan lup tertutup

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

1. Konstruksi lebih rumit
 2. Sangat akurat
 3. Gangguan dan perubahan kalibrasi akan menimbulkan kesalahan sehingga output mungkin berbeda dengan yang diinginkan.
 4. Dipengaruhi oleh masalah ketidakstabilan.
- c. Kontinu(analog) dan diskontinue (diskrit digital)
1. Berdasarkan perbandingan (proporsional), perubahan keluaran yang sebanding dengan penyimpangan (integral) dan diferensiasi serta gangguan dari PID.
 2. Sedangkan pengaturan dengan komponen-komponen diskrit dilakukan dengan ON OFF sistem, baik posisi gambar, maupun posisi yang relatif tidak terbatas.
- d. Servo dan Regulator

Sebenarnya servo dan regulator mempunyai bentuk yang sama yaitu mengatur sistem dalam daerah "steady state" konstan untuk signal masukan yang konstan. Perbedaan utama adalah regulator diberikan signal tambahan (gangguan = ϵ) sehingga menghasilkan keluaran yang berbeda dengan servo. Regulator mulanya dipakai untuk mengatur kecepatan dan tegangan. Perbedaan dari kedua bentuk ini dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

Pada servo diinginkan $r(t) = c(t) \rightarrow 1$ sedangkan pada regulator yang diinginkan

$$\frac{r(t) - c(t)}{U} \rightarrow 0$$

Kesimpulan

Penerapan sistem pengaturan dalam kehidupan sehari-hari sangat penting artinya terutama bagi peningkatan hasil produksi yang dapat meninggikan mutu, mengaktifkan tenaga kerja dan menciptakan suasana kerja yang lebih aman. Pengelompokan sistem pengaturan dapat diklasifikasikan menurut blok diagram, cara kerja, jenis alat atau sumber penggerakannya. Secara umum, sistem pengaturan

lebih banyak diklasifikasikan dalam bentuk pengaturan lup terbuka dan pengaturan lup tertutup

Sistem pengaturan juga diklasifikasikan berdasarkan apa yang diaturinya. Misalnya, pada servomekanisme mengatur posisi, kecepatan atau percepatan suatu objek yang sesuai dengan set point. Yang terpenting disini adalah seberapa jauh perbedaan yang terjadi pada respon terhadap setpoint. Sebagai penggerak sistem ini dapat berupa motor listrik dan hidraulik.

Sistem pengaturan proses mengontrol suhu, gaya, level, aliran, tekanan, komposisi kimia dan lain-lain. Pada sistem ini dapat dilakukan satu atau lebih banyak variabel dilakukan agar tetap pada set point. Respon yang mengakibatkan perubahan pada beban merupakan kualitas dari sistem pengaturan proses.

Tujuan utama dari sistem pengaturan adalah untuk mendapatkan optimisasi berdasarkan fungsi dari sistem itu sendiri dengan cara mengukur, membandingkan, mencatat, menghitung dan memperbaiki kesalahan sistem yang terjadi.

Bahan Bacaan

Dorf, R.C, Sistem Pengaturan (edisi ketiga), 1983, Penerbit Erlangga, Jakarta, hal. 2-19

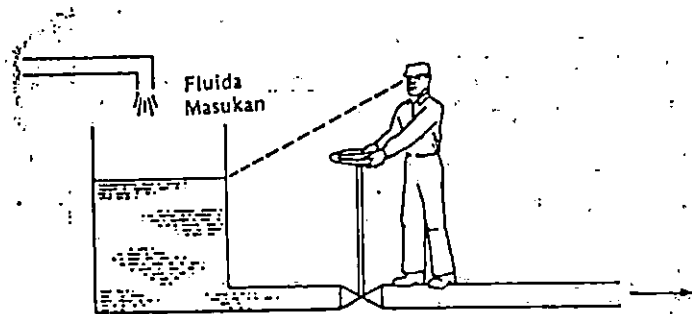
Jacob.J.Michael, Industrial Control Electronic, 1989, Prentice-Hall, Inc. New Jersey. hal.1-23

Ogata Katsuhiko, Teknik Kontrol Otomatik (jilid 1), 1985, Penerbit Airlangga, Jakarta hal.1-26

Pakpahan. Sahat, Kontrol Otomatik, 1988, Penerbit Airlangga, Jakarta. hal. 1-24

Soal-Soal Latihan

- 1-1. (a) .Sebutkan tiga buah sistem pengaturan pada sebuah pembangkit listrik.
 (b).Tentukan apakah sistem tsb. Sistem pengaturan lup terbuka atau lup tertutup
 (c). Jelaskan dengan singkat bagaimana sistem itu bekerja dan outputnya selalu dengan setpoint.
- 1-2. Berikan tiga alasan anda mengapa sistem pengaturan otomatis digunakan pada industri-industri.
- 1-3. Sebutkan jenis-jenis sistem pengaturan yang anda ketahui dan bandingkan masing- masing sistem.
- 1-4. Gambarkan blok diagram untuk sistem pengaturan katup seperti pada gambar di bawah ini.



- 1-5. Proses belajar mengajar juga merupakan sistem pengaturan lup tertutup. Gambarkan blok diagram sistem dan jelaskan masing-masing komponennya.

BAB II ELEMEN SISTEM PENGATURAN

Fungsi sistem pengaturan dapat berlangsung dengan baik, tergantung dari komponen-komponen dalam sistem itu. Dari berbagai jenis sistem yang telah dibicarakan diatas, terdapat komponen-komponen penting yaitu sensor/ transduser, detektor kesalahan, penguat, dan penggerak.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini, anda dapat :

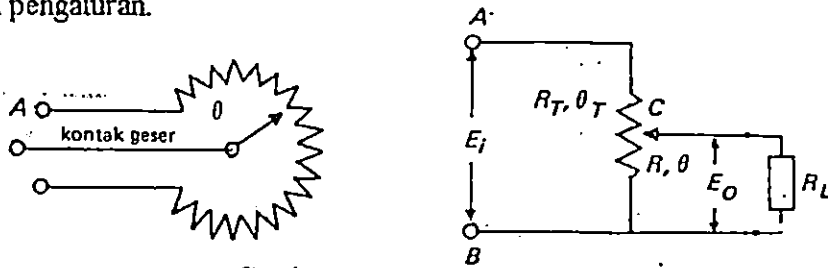
1. Mengetahui macam-macam transduser yang banyak dipakai industri sebagai sensor.
2. Menjelaskan prinsip kerja dan pemakaian transduser sebagai komponen pada sebuah sistem pengaturan
3. Menyebutkan fungsi detektor kesalahan pada sebuah sistem
4. Menjelaskan prinsip kerja magnetik amplifier sebagai penguat daya dan arus.
5. Mengenal macam-macam penggerak pada sebuah sistem,

2.1. Transduser

Suatu variabel perlu dikontrol secara akurat, maka sebelumnya perlu dilakukan pengukuran. Elemen yang berhubungan langsung dengan yang diukur disebut sensor. Dan alat yang digunakan untuk mengubah suatu besaran fisis ke besaran fisis lain (elektrik) disebut transduser. Misalnya, potensiometer. Dalam pemakaian sistem kontrol di industri banyak digunakan transduser jenis pemindahan. Parameter-parameter yang berubah menghasilkan signal output listrik. Misalnya mengubah nilai tahanan, induktansi, kapasitansi atau tegangan outputnya. Berikut ini diberikan beberapa contoh transduser yang sering dipakai untuk pengaturan sistem.

2.1.1. Potensiometer

Potensiometer adalah tahanan geser yang dapat diatur mulai dari 0 hingga maksimum melalui sebuah kontak geser. Posisi penggeserannya dapat mendatar dari kiri ke kanan atau melingkar sepanjang 300° dan 330° . Masalah yang sering dialami potensiometer yaitu pengaruh pembebanan yang dapat mengganggu ketelitian pengaturan.



Gambar.2-1. Potensiometer

Apabila C berada pada posisi A maka tahanan potensiometer adalah 0 dan bila pada B, tahananannya adalah maksimum. Jika tahananannya dalam satuan panjang adalah konstan, potensiometer dikatakan linear, saat potensiometer dihubungkan dengan sumber tegangan V_{in} dan posisi kontak geser pada $C = r$, maka output tanpa beban adalah

$$V_{2U} = \frac{r}{R} V_{in} = \alpha V_{in}$$

α adalah perbandingan nilai r dan R

Apabila potensiometer dibebani sebesar R_L paralel dengan R maka tegangan output berbeban menjadi V_{2L} adalah

$$V_{2L} = \frac{V_i \cdot R_p}{R_p + (R - r)}$$

dimana $R_p =$ Tahanan pengganti R_L dan r , jika $r = \alpha R$ dimasukkan kedalam persamaan V_{2L} maka

$$V_{2L} = \frac{\alpha V_i}{1 + \alpha(1 - \alpha)(R/R_L)}$$

Pengaruh beban membuat pengaturan potensiometer sebenarnya lebih kecil dari kenyataannya atau $V_{2L} < V_{2U}$, sehingga kesalahan terjadi sebesar

$$e = \alpha V_{in} \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \alpha)(R/R_L)} \right]$$

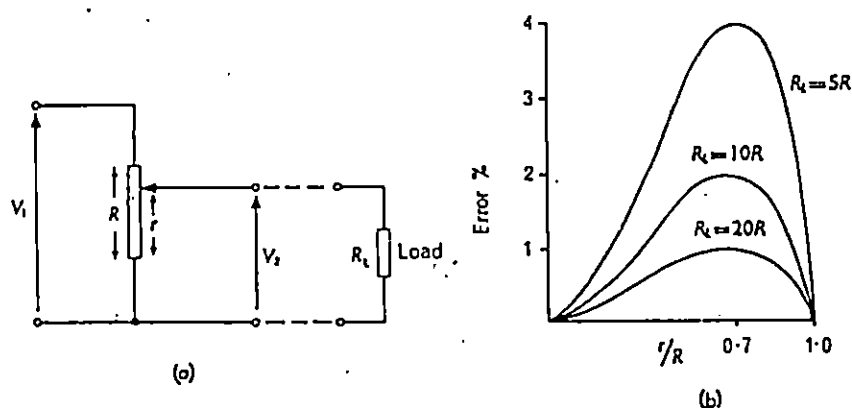
Jika $R/R_L \ll 1$, persamaan ini dapat disederhanakan dengan mengembangkan persamaan kedua dalam kurung oleh teori polinomial

$$e \equiv \alpha^2 (1 - \alpha) \cdot \frac{R}{R_L} \cdot V_L$$

Contoh. Apabila $\alpha = 0,5$ dan $R/R_L = 0,05$ dan $e = 0,00625 V_L$

Koefisien 0,000625 harus ditambahkan ke nilai tanpa beban dengan posisi agar memberikan output tepat 50%, sehingga pengaturan potensiometer pada posisi 0,50625 bahagian.

Dari persamaan diatas nampak bahwa kesalahan yang terjadi dipengaruhi oleh R/R_L . Kesalahan ini digambarkan seperti pada gambar 2-2.



Gambar.2-2. Pengaruh beban pada potensiometer.

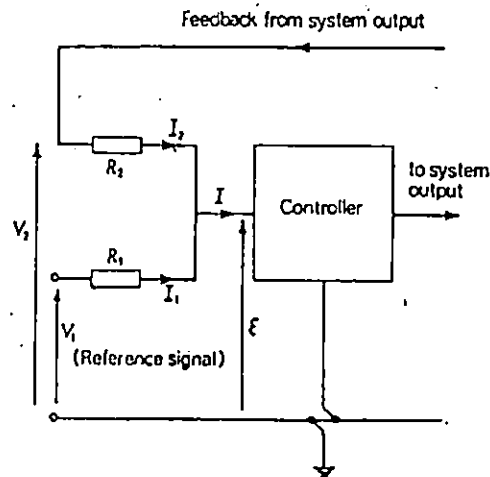
Dimana kesalahan puncak terjadi pada posisi kontak berada 70%.

Linearitas potensiometer didefinisikan sebagai penyimpangan maksimum dari tegangan output sebenarnya yaitu dari αV_{in} . Linearitas ini dipengaruhi oleh beban dan untuk menghilangkan pengaruh pada linearitas biasanya harga R_L dibuat paling sedikit 20 kali nilai R . Pengaruh lain yaitu karena konstruksi dan gulungan kawat dengan diameter, tahanan kawat yang serba sama dan konsisten.

2.1.1.1. Potensiometer sebagai pendeteksi kesalahan sistem

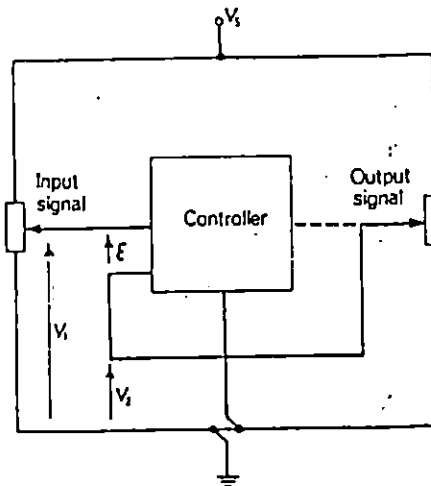
Dua metode pengembangan signal kesalahan menggunakan potensiometer dirangkai seperti gambar berikut dengan sambungan shunt negatif feedback. V_1 dan V_2 adalah berasal dari sumbu input dan output potensiometer pada sistem kontrol.

$I = I_1 + I_2$ dan pada kondisi steady state, arus I mengalir ke amplifier = 0, maka $I_1 + I_2 = 0$ atau $I_1 = -I_2$. Agar terjaga baik, V_1 dan V_2 haruslah dengan polaritas yang berlawanan arah, jika V_1 positif maka V_2 negatif dan sebaliknya. Dalam keadaan steady state, apabila $I = 0$, maka kesalahan = 0, oleh sebab itu $I_1 = V_1/R_1$ dan $I_2 = V_2/R_2$. Apabila harga $R_1 = R_2$ maka $V_1 = -V_2$. Rangkaian ini dipakai pada pengaturan sistem servo sebagai elemen feedback seperti pada gambar 2.-3a.



Gambar.2-3a. Rangkaian potensiometer sebagai pendeteksi kesalahan .

Rangkaian pada gambar 2-3b menggunakan tegangan feedback negatif dengan menyambungkan signal input dan output secara seri. Signal kesalahan yang terjadi adalah perbedaan V_1 dan V_2 . Dari ilustrasi ini, nampak bahwa sistem bekerja atas keseimbangan sendiri melalui rangkaian jembatan wheatstone. Contoh pemakaiannya digambarkan pada gambar 2-3.



Gambar 2-3b. Servomekanisme pengatur posisi.

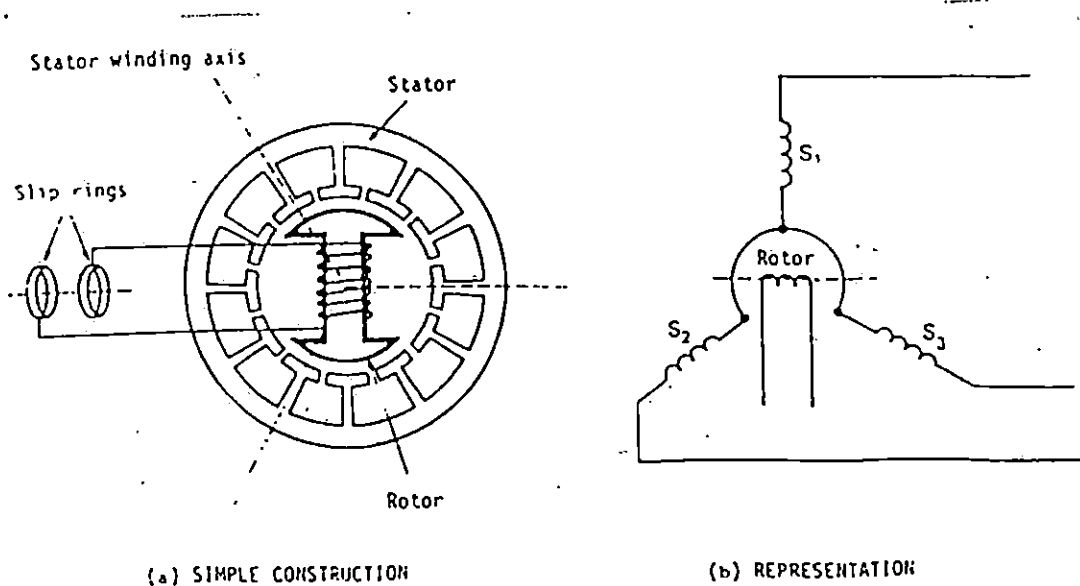
2455/K/2000-d2(38)

2.1.2. Elemen Sinkro

Sinkro adalah suatu alat yang menggunakan prinsip trafo. fasa tunggal dengan belitan primernya dapat diputar berdasarkan sejumlah lilitan sekunder. Alat ini merupakan traansduser magnetik yang digunakan untuk memindahkan posisi sudut putaran sumbu ke bentuk sinyal listrik. Elemen sinkro ini ada 2 macam yaitu pemancar dan penerima sinkro.

2.1.2.1. Pemancar Sinkro

Pemancar Sinkro terdiri dari stator dan rotor yang terbuat dari plat besi yang dilaminasi untuk mengurangi kerugian akibat arus liar (Eddy current). Stator sebagai lilitan sekunder terbuat dari 3 kumparan yang berselisih 120° seperti pada gambar 2-4.

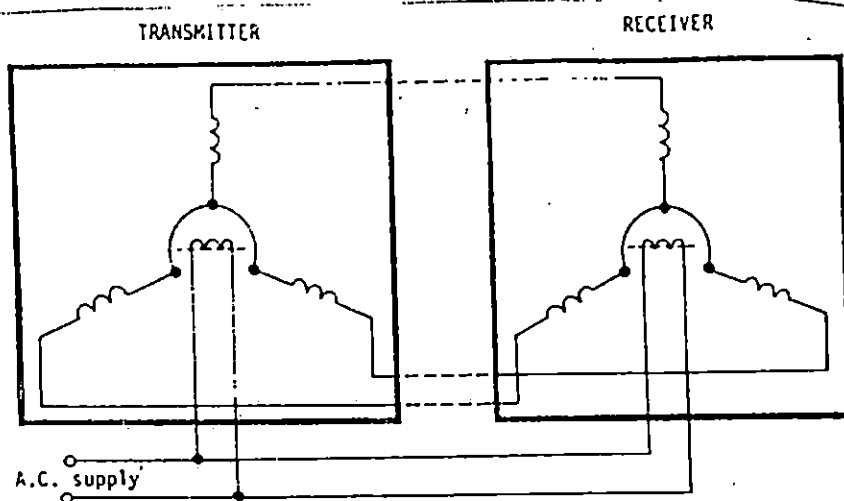


Gambar.2-4. Konstruksi elemen sinkro.

Sedangkan rotor sebagai kumparan primer terdiri dari kumparan tunggal yang dapat berputar didalam ruang stator. Sumber daya dimasukkan melalui cincin seret yang terpasang pada sumbu sinkro. Biasanya frekuensi supply adalah 50, 60 atau 400 Hz pada tegangan dari 50 s.d. 115 Volt rms. Ketika rotor (R_1 , R_2) diberi energi, ggl diinduksi pada belitan stater S_1 , S_2 dan S_3 . Besar dan fasa tegangan induksi tergantung dari hubungan posisi stator dan rotor.

2.1.2.2. Penerima Sinkro

Penerima sinkro mempunyai konstruksi yang sama dengan pemancar sinkro. Perbedaannya yaitu penerima sinkro mempunyai gesekan gigi yang kecil dan dari segi mekanis membuat gerakannya tidak beresilasi secara akurat. Rangkaian transmisi data sinkro yang khusus dapat dilihat pada gambar 2-5.



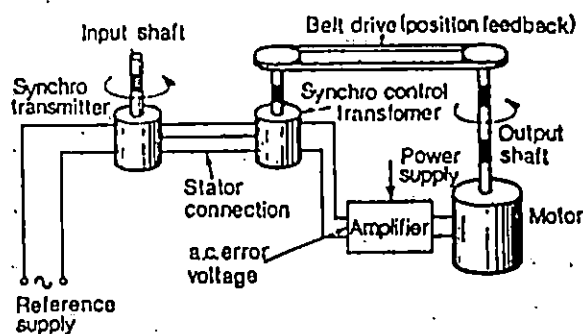
Gambar.2-5. Sistem transmisi data pada sinkro

Rotor disupply dengan sumber, terminal kedua stator disambungkan. Ketika posisi kedua rotor sejajar dan segaris, ggl tidak terbaangkit sekeliling stator dan arus tidak mengalir dalam lilitan stator. Jika terjadi penyimpangan, besaran dan fasa dari ggl pada lilitan stator penerima dan pemancar tidak sama dan arus mengalir pada rangkaian stator. Hal ini menimbulkan torsi lawan dan rotor penerima berusaha mensejajarkannya dengan rotor pemancar.

Apabila penerima hanya menunjukkan posisi rotor pemancar, lalu memposisikan lebih kurang $\frac{1}{4}$ derajat secara akurat. Selama pengaturan ini tidak merupakan sistem pengaturan lup tertutup tidak terjadi penguatan daya, maka kesalahan posisi akan naik ketika receiver menghasilkan torsi. Arus yang ditarik dari stator pemancar diperlukan untuk menimbulkan torsi penerima dan ditambah dengan arus kemagnetannya. Untuk memperbaiki akurasi sistem transmisi data, faktor daya penerima dapat diperbaiki dengan memasang kapasitor pada jala-jala.

2.1.2.3. Elemen sinkro pada sistem pengatur posisi.

Sebuah pengaturan posisi servo system yang sederhana menggunakan sinkro yang digambarkan pada gambar 2-6.

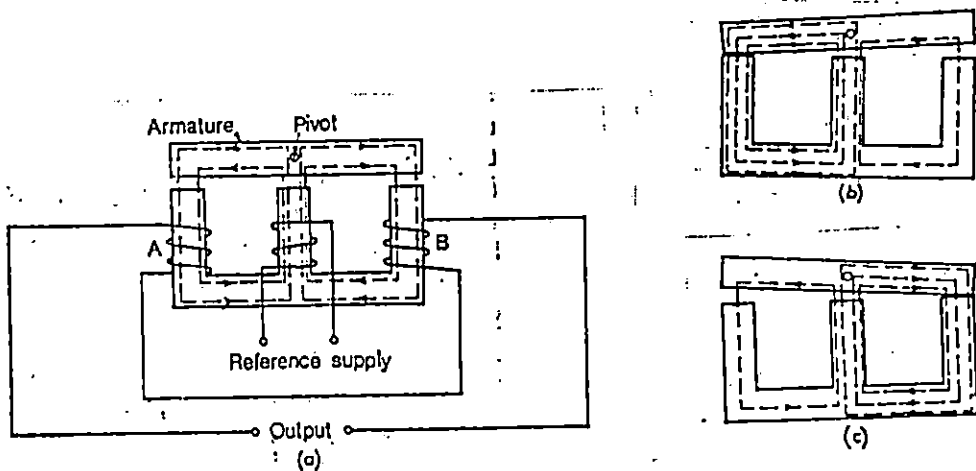


Gambar.2-6. Sinkro dipakai sebagai pengatur posisi.

Posisi input dipindahkan ke dalam signal listrik oleh transmitter dalam bentuk medan magnet pulsasi di dalam trafo pengatur. Dengan pengaruh kopling mekanik yang ada diantara sumbu motor dan transformator kontrol, maka ggl yang diinduksikan ke dalam belitan rotornya tergantung dari pergeseran sudut antara sumbu input dan outputnya. Transmitter berfungsi sebagai transduser posisi input dan trafo pengendali berperan sebagai transduser output posisi dan detektor kesalahan. Sinkro yang khusus seperti gambar di atas memberikan perubahan 1 V rms setiap derajat pergeseran sumbu. Tegangan kesalahan diperkuat dan digunakan untuk mengendalikan motor dan trafo pengatur, sehingga kesalahan menjadi nol.

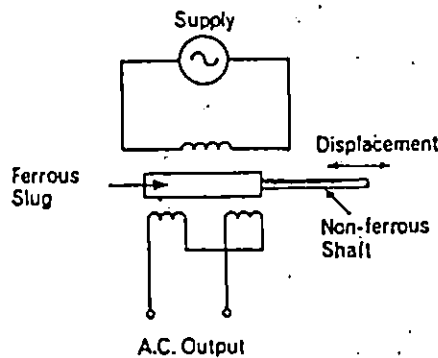
2.1.3. LVDT

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) adalah transduser pasif yang bekerja berdasarkan pemindahan inti besi pada sebuah transformator. Biasanya digunakan untuk mengukur berat, tekanan dan percepatan yang berhubungan dengan gaya. LVDT beroperasi sama seperti transformator dengan inti berbentuk huruf E dan I. Konstruksinya digambarkan seperti pada gambar 2-7.



Gambar. 2-7. Inti transformator E-I dipakai sebagai LVDT

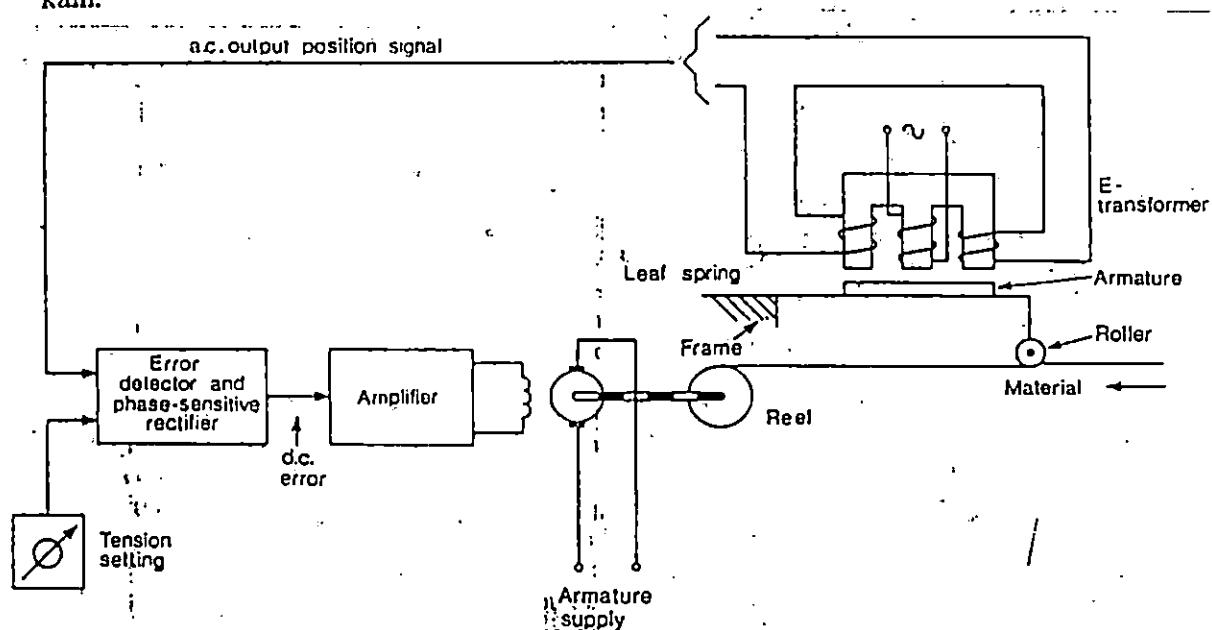
Kedua belitan bahagian luar disambungkan seri dan berlawanan arah. Karena jumlah lilitan pada kedua bahagian sama, maka reluktansi nya sama dengan nol ketika posisi berada ditengah-tengah. Apabila belitan bahagian tengah diberi tegangan maka ggl yang terinduksi pada belitan luar sama dengan nol. Untuk pergeseran yang kecil dan berlawanan dengan arah jarum jam seperti pada gambar 2-7 b, reluktansi pada lilitan bahagian kiri berkurang sedangkan pada bahagian kanan bertambah. dan ggl yang terinduksi pada kumparan A bertambah besar dari kumparan B. Tegangan output akan sebanding dengan pergeseraan inti besi.(armatur). Demikian sebaliknya. Untuk mendeteksi besaran dan arah gerakan armatur output diberikan ke pendeteksi fase yang peka. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kesalahan yang terjadi akan sebanding dengan tegangan output. Konstruksi LVDT biasanya dibuat seperti pada gambar 2-8. Dan prinsip kerjanya tidak berbeda dengan transformator inti E-I.



Gambar.2-8. Linear Variable Differential Transformer.

Ketika berada ditengah-tengah E_1 sama dengan E_2 dan V_{out} adalah nol. Bila inti berada dekat S_2 , E_2 akan naik dan E_1 akan turun. Dan tegangan output menjadi $E_2 - E_1$ dengan arah mengikuti E_2 . Demikian pula sebaliknya apabila inti mendekati S_1 , $E_1 > E_2$ dan $V_{out} = E_1 - E_2$ sefase dengan E_1 .

Contoh penggunaan LVDT sebagai sensor pada sebuah siste dapat diperlihatkan pada gambar 2-9 yaitu sebagai pengaturan keregangan penggulungan kertas atau kain.



Gambar 2.9. LVDT sebagai pengatur keregangan penggulungan bahan.

2.1.3.1. Keuntungan LVDT.

1. Memberikan tegangan output untuk perubahan inti yang kecil atau kepekaan (V/M) tinggi. Kepekaannya berkisar antara 500mV/mm sd. 300mV/mm.
2. Dapat beroperasi pada suhu antara -265 C sd. 600 C
3. Cocok untuk perancangan tahan radiasi pada reaktor nuklir.

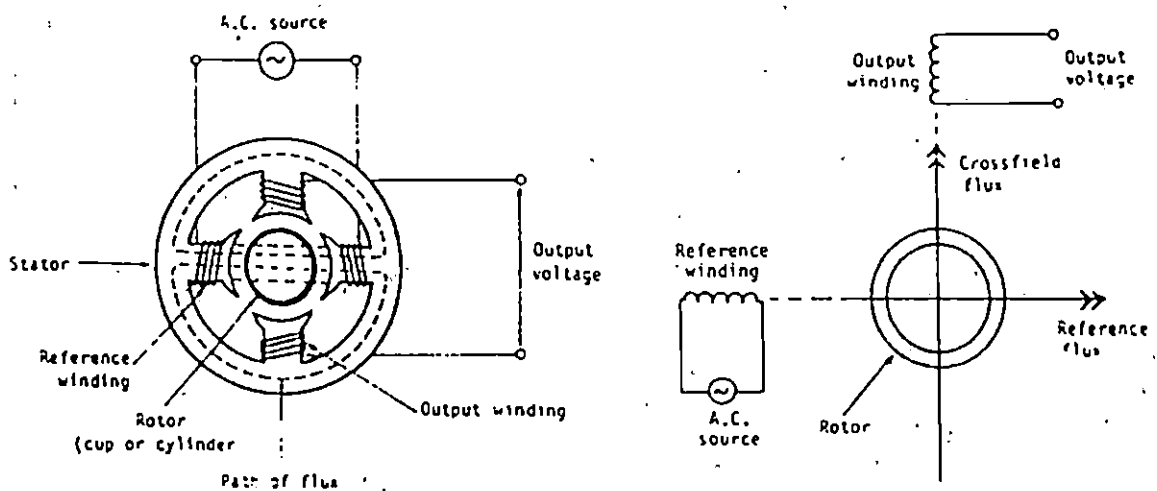
2.1.4. Tachogenerator.

Tachogenerator adalah sebuah generator yang memberikan tegangan sebanding dengan kecepatan sudut putar dan digunakan pada kontrol feedback secara luas. Tachogenerator dapat dibuat dari magnet permanen jenis arus bolak-balik atau arus searah.

Tachogenerator DC adalah generator kecil yang mempunyai penguatan pasti. Medan magnet yang dihasilkan berasal dari magnet permanen atau dari lilitan yang mendapat sumber DC. Tegangan yang dihasilkan oleh lilitan output akan sebanding dengan kecepatan berputarnya rotor. Polaritas tergantung dari arah putar. Keuntungan tachogenerator dc ini adalah tegangan dari 10-20 V per 1000 rpm dapat dihasilkan dan linearitasnya lebih baik 0,1 percent. Kelemahannya adalah kebutuhan akan sikat arang dan komutator yang memerlukan perawatan rutin dan menimbulkan kerutan akibat frekuensi tinggi pada tegangan output. Kelemahan ini dicegah dengan adanya tachogenerator AC yang disebut juga dragcup-tachogenerator atau tachogenerator induksi.

2.1.4.1. Drag-cup tachogenerator

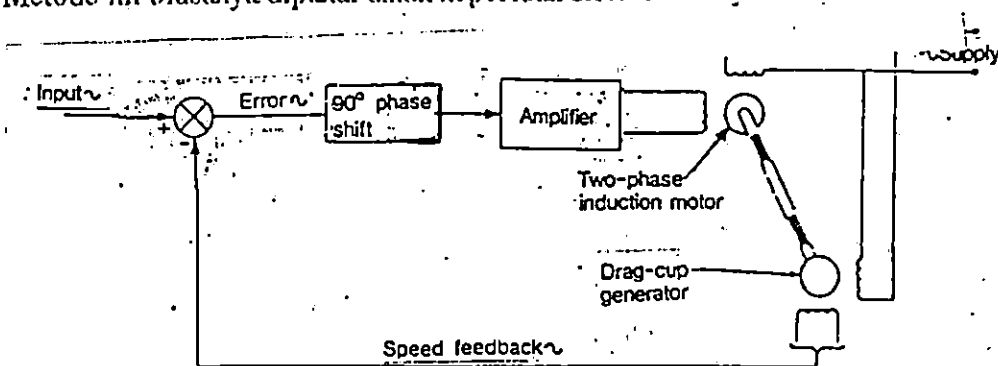
Drag-cup tachogenerator adalah mesin induksi dua fase yang berselisih 90° terdiri dari stator dan rotor. Pada stator terdapat lilitan referensi yang disupply oleh sumber AC dengan besaran dan frekuensi tetap, serta lilitan output yang digunakan sebagai tegangan pembanding kecepatan. Rotor dibentuk seperti mangkuk atau silinder yang terbuat dari aluminium atau tembaga. Prinsip kerja dari tachogenerator ini terlihat pada gambar. 2-10.



Gambar 2-10. Drag-cup tachogenerator

Ketika rotor diputar dalam keadaan tetap, tidak terjadi kopling antara lilitan output dan input, maka tegangan output sama dengan nol. Perputaran rotor yang dikopel dengan beban atau motor penggerak akan menyebabkan terjadinya ggl yang menimbulkan arus pusar (arus Eddy). Arus ini menimbulkan medan lintang magnetik yang tegak lurus terhadap medan yang ditimbulkan oleh medan utama seperti terlihat pada gambar 2-10.b. Dengan adanya kopling dari kedua medan ini maka timbul tegangan yang sebanding dengan kecepatan putaran yang diinduksikan melalui lilitan output.

Suatu sistem pengaturan kecepatan seperti pada gambar 2-10 menggunakan motor induksi dua fase sebagai unit pengemudi dan drag-cup tachogenerator dipakai sebagai sensor untuk mendeteksi kesalahan dari sistem. Input ac dan sinyal output dibandingkan untuk mendapatkan sinyal kesalahan. Penggeser fase sebesar 90° untuk memastikan pergeseran fase antara kedua arus dalam lilitan motor tersebut. Setelah dikuatkan, tegangan kesalahan dipakai untuk lilitan pengatur motor, agar rotor berputar pada kecepatan yang sesuai dengan sinyal input dan sistem dikuatkan sehingga kecepatan motor penggerak (motor induksi dua fase) dapat di atur. Metode ini biasanya dipakai untuk keperluan sistem berdaya rendah.



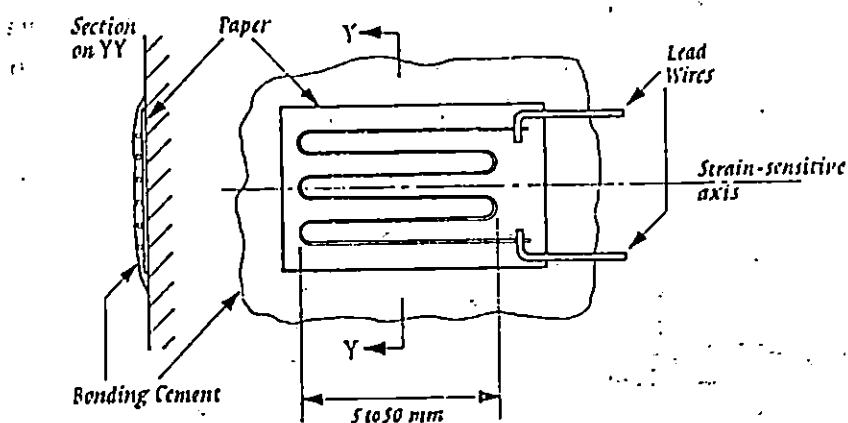
Gambar.2-11. Pengaturan kecepatan dengan drag-cup Tachogenerator

2.1.5. Strain gauge.

Istilah strain dapat didefinisikan sebagai perubahan panjang per satuan panjang suatu benda bila benda itu diregang atau ditekan oleh suatu gaya. Prinsip kerja strain gauge didasarkan atas perubahan nilai hambatan suatu penghantar yang berdiameter halus ($50 \mu\text{m}$) akibat regangan atau tekanan.

Strain gauge secara umum digunakan untuk mengukur berat, tekanan, gaya mekanik, dan lain-lain. Melihat dari bentuknya, strain gauge dibagi dua macam, yaitu terikat (bonded SG) dan lepas (unbonded SG.)

Jenis terikat lebih banyak digunakan orang, karena konstruksinya lebih kuat seperti pada gambar 2-12. Bahannya dibuat dari kawat, gulungan logam dan kristal semi konduktor.



Gambar.2-12. Strain gauge tahanan jenis terikat.

2.1.5.1 Prinsip kerja.

Apabila sebuah benda ditekan atau diregang maka terjadi perubahan bentuk dari panjang dan penampang benda itu. Dengan kata lain panjangnya akan bertambah dan penampang akan berkurang. Perubahan ini akan menyebabkan terjadinya kenaikan nilai tahanan, karena

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Kenaikan nilai tahanan ini sebanding dengan gaya yang menyebabkan terjadinya perubahan benda tersebut. Oleh sebab itu, tahanan strain gauge adalah

penunjukan dari tekanan atau regangan yang ditanggung oleh permukaan tempat strain gauge diikal.

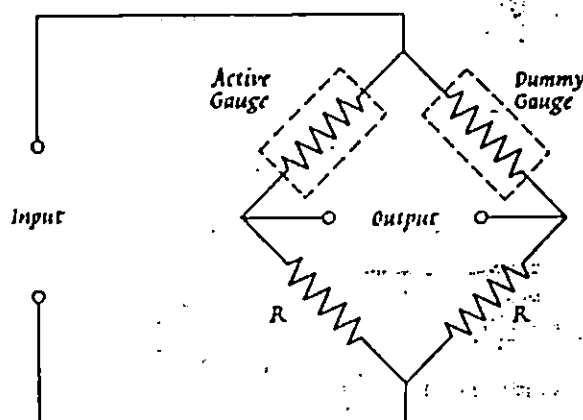
Apabila besaran fisik dari perubahan nilai tahanan dan tahanan strain gauge dibandingkan maka didapat pecahan yang menggambarkan faktor gauge, K

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\text{strain}, \sigma}$$

Nilai K untuk logam bervariasi dari -12 (untuk nikel) sampai +6 (untuk alloy) sedangkan untuk semikonduktor bervariasi dari 50 sd. 200. Menggunakan strain gauge dari silicon sangat baik dan dapat mengukur tekanan yang amat kecil, karena ia mempunyai faktor gauge yang tinggi. Semakin tinggi faktor gauge, semakin peka strain gauge itu. Dari persamaan 2. 6. Dapat ditulis bahwa

$$\text{Strain} = \frac{\Delta R/R}{K}$$

Perubahan tahanan dari unsur gauge sangat kecil ,berkisar 1-2% dan untuk mengukur nilai tahanan tsb. dipakai rangkaian jembatan Wheatstone. Sedangkan strain gauge yang selalu dipakai pada kondisi yang dipengaruhi oleh suhu, diperlukan kompensasi dengan menambah sebuah gauge semu yang disebut dummy gauge. (seperti pada gambar 2-13)



Gambar. 2-13. Rangkaian kompensasi SG karena pengaruh suhu.

1. Bentuk sederhana, dan mudah memasangnya.
2. Dalam pemakaian AC, mampu mengukur frekuensi s.d. 100 K.Hz.
3. Kurang peka terhadap getaran dan vibrasi yang tak diinginkan
4. Mempunyai linearitas dan histerisis yang baik.

2.1.5.2. Contoh soal.

1. Sebuah SG dengan faktor gauge $K = 2$ diikat pada sebatang besi yang diregang sebesar 10^{-6} . Jika tahanan gauge sebelum diregang adalah 120 Ohm, hitunglah perubahan tahanan gauge.

Penyelesaian

$$K = \frac{\Delta R/R}{\sigma}$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sigma KR \\ &= 10^{-6} \times 2 \times 120 = 240 \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

2. Sebuah SG logam dengan $K = 2$ diikat pada sebatang besi yang diberi tekanan sebesar $10,5 \times 10^9$ N/m.

Apabila modulus kekenyalan besi 21×10^{12} N/m, hitunglah perbandingan perubahan tahanan gauge akibat tekanan tersebut!

Penyelesaian.

$$\text{Modulus kekenyalan} = E = \frac{\text{stress}}{\text{strain}}$$

$$\text{Strain,} = \frac{10,5 \times 10^9}{21 \times 10^{12}} = 5 \times 10^{-4}$$

$$\text{Maka, } K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\text{strain, } \sigma}$$

$$\Delta R/R = \sigma K = 5 \times 10^{-4} \times 2 = 0,001 = 0,1 \%$$

2.2. Elemen Penggerak

Alat ini berfungsi untuk mengatur aliran energi ke sistem yang diatur. Misalnya generator, motor listrik, roda gigi dan katup. Bahagian ini akan membahas operasi dan karakteristik serta pemakaian motor dan generator sebagai elemen penggerak pada sistem pengaturan.

2.2.1. Generator

Prinsip kerja generator berdasarkan hukum Faraday yaitu apabila sebatang kawat diputar dalam medan magnet maka pada ujung-ujung kawat itu akan terinduksi ggl. Tegangan induksi ini berbentuk sinusoida yang dialirkan melalui cincin seret dan sikat. Pada generator DC, sebagai pengganti cincin seret digunakan komutator yang bentuknya seperti silinder beralur banyak dan mempunyai beberapa segmen. Tujuannya untuk perataan tegangan sinusoidal yang dihasilkan oleh ujung-ujung kawat itu. Generator DC bekerja dengan penguatan terpisah dan penguatan sendiri. Dalam sistem pengaturan, generator DC dengan penguatan terpisah lebih banyak dipakai karena arus medan disuplai sumber daya dari luar. Tegangan rata-rata yang dihasilkan jangkar sebanding dengan kecepatan sudut ω dan fluks ϕ dari arus medan., sehingga:

$$E = k \times \phi \times \omega$$

Dimana : k adalah konstanta fisik.

Fluks sisa menyebabkan kenaikan tegangan output sisa, besaran ini cukup signifikan digunakan pada sistem lup tertutup. Generator DC dengan penguatan lebih disebut juga dengan Penguat Rotary yang dirancang khusus untuk memecahkan masalah ini.

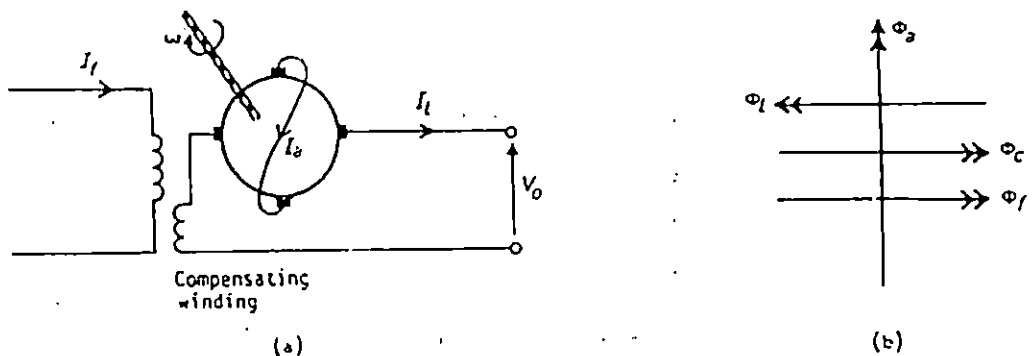
2.2.2. Generator medan-lintang.

Penguat rotary dengan penguatan tinggi yang terkenal adalah generator medan lintang yang dapat pula digunakan sebagai sumber arus tetap atau sumber tegangan tetap. Generator medan lintang adalah generator dengan penguatan terpisah yang dikemudikan oleh motor induksi. Seperti pada gambar 2-14. Terdapat 4 buah sikat yang dipasang saling tegak lurus. Dua diantaranya dihubungkan singkat dan output diambil dari ujung-ujung sikat lain. Arus medan I_f berfungsi

sebagai pengatur arus. Selama kedua sikat itu terhubung singkat, maka I_a akan menjadi sangat besar dan menghasilkan fluks yang berpotongan tegak lurus terhadap fluks medan. Begitu arus beban (I_L) mengalir fluks reaksi (ϕ_r) akan terbentuk dan berlawanan arah. Ketika tidak berbeban V_o sebanding dengan I_a dan dapat diatur oleh I_f . Saat arus beban mengalir, amper lilit efektif menjadi

$$I_f N_f - I_L N_a$$

Dimana N_a adalah lilitan jangkar efektif. Dapat dilihat bahwa dari harga arus medan, karakteristik beban akan sama seperti karakteristik rangkaian terbuka tetapi secara efektif bergeser tegak lurus. Harga arus sebenarnya tergantung pada harga amper-lilit, seperti gambar 2.14b). Mendapatkan amper lilit "efektif" kecil pada saat tidak jenuh, arus beban hampir tetap konstan . Generator "Arus konstan" ini disebut metadyne.



Gambar 2.14. Metadyne

Pengaruh reaksi fluks sebagai feedback negatif, terbentuk oleh arus beban, dapat dikurangi dengan menambah lilitan kompensasi pada rangkaian beban yang ditempatkan sedemikian rupa untuk membantu fluks medan., seperti dalam gambar 2.14. Akibatnya memberi pengaruh terhadap pembalikan putaran yang berlawanan dengan arah jarum jam dan menaikkan waktu respons. Berdasarkan atas penundaan persentase fluks , akan timbul karakteristik lain. Sebuah mesin yang berkompensasi 100%, maka $\phi_r = \phi_c$ Mesin ini disebut *Amplidyne*. Seperti dalam gambar 2.15 batasan tidak mencapai kejenuhan dengan variasi arus beban yang banyak, variasi tegangan output sedikit, akibatnya tegangan generator yang konstan.

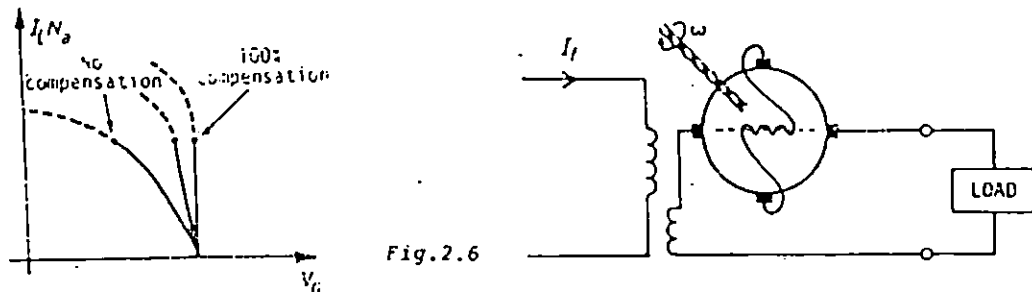


Fig.2.6

Gambar 2.15 Karakteristik kompensasi Arus beban

Lilitan bantu yang dipasang tegak lurus pada lilitan medan utama seperti dalam gambar 2.15 akan menghasilkan fluks yang membantu medan jangkar. Oleh sebab itu, amper lilit yang diperlukan dapat dicapai pada arus yang lebih rendah, yang mengurangi semua ukuran, panas jangkar, kerusakan sikat dan komutator.

Perbandingan daya out put dan input merupakan ukuran penguatan dan dengan arus medan yang kecil (50 mA) dapat mengatur daya output dalam batas Kilo Watt, penguatan daya yang besar dapat dicapai.

2.2.3 Motor

Prinsip kerja motor berdasarkan atas sepotong kawat yang dialiri arus listrik dan ditempatkan pada medan magnet akan mengalami gaya pada kawat itu. Gaya ini digunakan untuk memutar sumbu dari penghantar itu. Motor DC maupun AC, banyak dipakai didalam sistem pengaturan. Konstruksi motor DC sama seperti generator DC. Pada motor DC, gaya yang terjadi pada setiap konduktor adalah :

$$F = B \times I \times l \sin \phi$$

Dimana B adalah kepadatan fluks magnet, I adalah arus yang lewat pada penghantar, l panjang kawat penghantar, ϕ adalah sudut antara batang penghantar dan medan jangkar. Gaya ini menimbulkan torsi pada jangkar. Dan inilah yang menyebabkan motor berputar. Torsi yang dihasilkan sebesar :

$$T = K \times \phi \times I_a$$

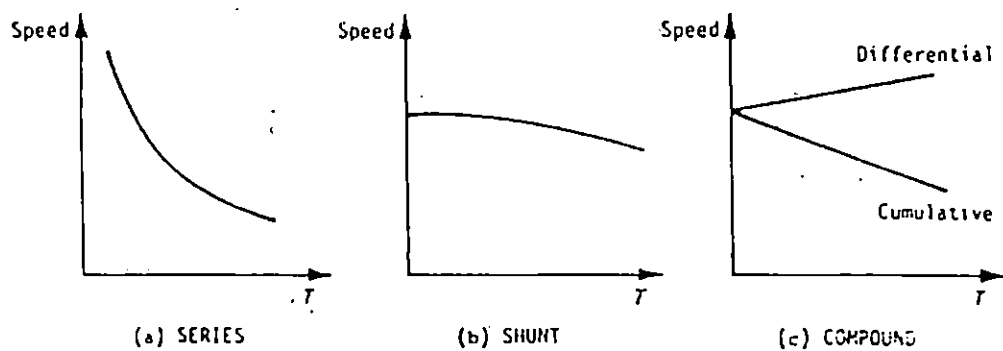
dimana ϕ = jumlah fluks / kutub

I_a = arus jangkar

P^l = jumlah lapisan lilitan penghantar

$$K = \frac{P Z}{60 \times 10^{11} \times P^i}$$

Putaran jangkar pada medan magnet menyebabkan timbulnya ggl dalam kawat tersebut (prinsip generator). Pada motor, ggl ini disebut ggl lawan, yaitu menantang arus penyebabnya (hukum Lenz). Jenis motor DC ada 3 macam yaitu motor seri, motor shunt dan motor kompon.



Gambar 2.16 Karakteristik Motor DC

2.2.3.1. Motor Servo DC

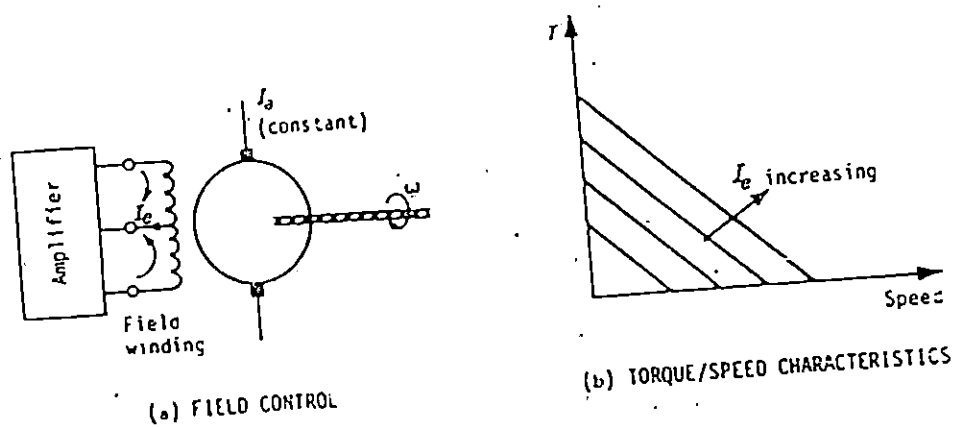
Motor servo DC dirancang khusus dengan torsi awal yang tinggi dan inersia yang rendah. Dipakai untuk mengatur arah putaran, dengan alasan sebagai berikut :

- a. Putarannya dapat dikontrol terus menerus
- b. Memiliki kesanggupan memperkuat daya

Pada motor servo DC ukuran besar, lilitan medan disupply dari sumber tegangan yang tetap dan lilitan jangkar digunakan untuk mengontrol kecepatan. Motor Servo DC yang kecil memakai lilitan medan untuk pengaturan kecepatan, jangkar disupply dari sumber arus tetap. Torsi yang terbentuk akan sebanding dengan arus jangkar dan fluks terbentuk pada lilitan medan.

Motor DC yang banyak dipakai untuk itu adalah motor medan belah (split-field motor) dengan penguatan terpisah yang lilitan medamnya berbentuk centertapped dengan dua sisi yang berlawanan. Fluks yang terbentuk pada lilitan medan sebanding dengan arus efektif. Besarnya I_e adalah perbedaan antara arus pada setiap belahan lilitan medan. Saat arus sama besar $I_e = 0$ dan torsi tidak terbentuk. Arus yang takseimbang ini dipakai untuk mengatur kecepatan dan arah putaran motor. Seperti pada gambar 2.17 lilitan jangkar disupply oleh sumber arus tetap sedangkan lilitan medan disupply oleh amplifier type push pull. Arus medan biasanya kecil, maka diperlukan lilitan medan yang banyak untuk menaikkan induktansi.

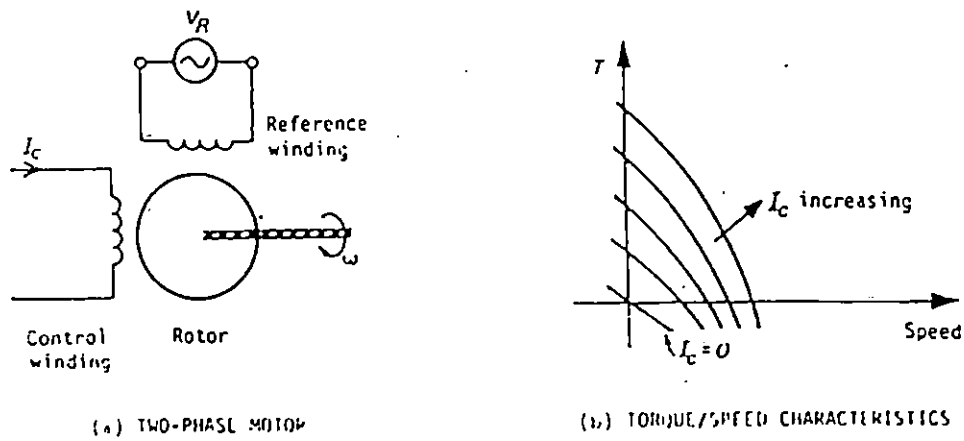
Perubahan mendadak pada arus medan akan menaikkan tegangan induksi dan merusak motor. Oleh sebab itu, perlu pengamanan bunga api yang dipasang paralel dengan lilitan medan. Karena motor servo itu memerlukan torsi awal yang tinggi dan inersia yang rendah bentuk jangkarnya panjang dan kurus.



Gambar.2.17. Servomotor DC

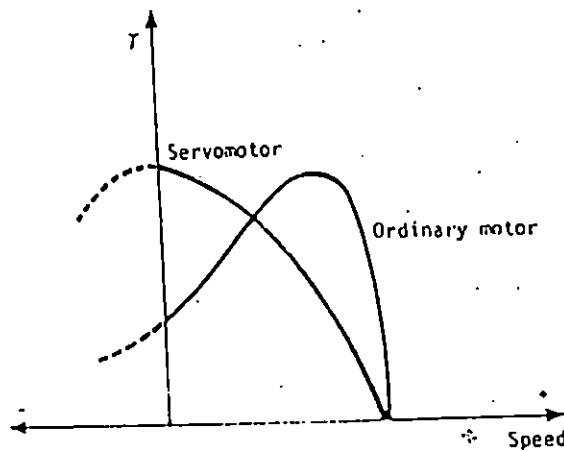
2.2.3.2. Motor Servo AC

Motor AC yang sering digunakan pada sistem pengaturan adalah motor induksi dua fase, karena cocok untuk daya kecil dan bentuknya sederhana. Statornya terdiri dari dua lilitan medan yang saling tegak lurus untuk menghasilkan medan putar pada motor.



Gambar. 2.18. Motor AC dua fase

Salah satu fase disupply dari tegangan acuan V_r tetap dan fase lain untuk mengatur medan dan mendapat sumber dari output penguat servo. Kecepatan putarnya sebanding dengan arus kontrol I_c , fase ini yang menunjukkan arah putaran. Karakteristik torsi/kecepatan motor dapat dilihat pada gambar 2.19. Perlu dicatat bahwa kurva untuk arus kontrol nol menuju tempat awal dengan kemiringan negatif. Ini berarti, bila arus kontrol menjadi nol, motor mengalami penurunan torsi dan akhirnya berhenti. Kurva ini juga menunjukkan torsi yang besar pada kecepatan nol. Rotor dibuat dari bahan dengan reluktansi magnetik rendah dan tahanan listrik yang tinggi. Hal ini untuk mencegah penunggakan fase, memperbaiki linearitas torsi/beban, dan memberikan torsi awal yang tinggi untuk merespon cepat pada beberapa servo dalam pengaturan posisi.



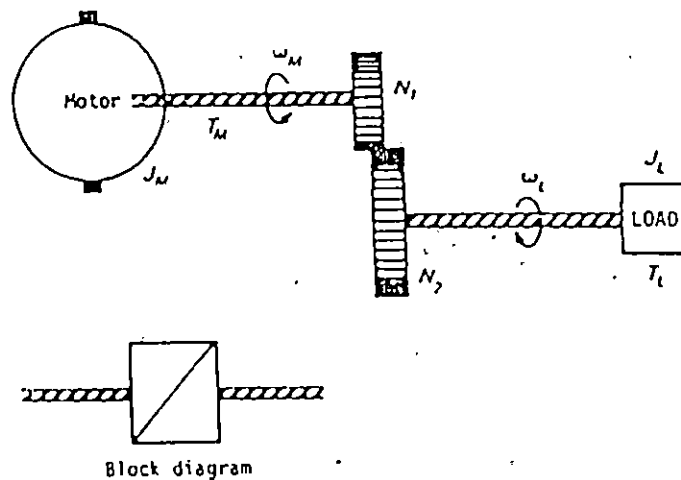
Gambar.2.19. Karakteristik servomotor dan motor yang biasa.

2.2.4. Roda gigi

Roda gigi adalah alat yang dapat memindahkan daya mekanik untuk mempercepat dan memperlambat putaran berdasarkan diameter masing-masing roda gigi. Sistem ini sering digunakan dalam sistem pengaturuan karena :

- Ekonomis dalam perencanaan motorservo dengan kecepatan tinggi daripada membebaninya
- Memberikan percepatan pembebanan yang lebih tinggi bagi motor

Prinsip kerja roda gigi sama seperti prinsip kerja transformator pada rangkaian listrik. Untuk itu , mencari besaran seperti pengaruh kelembaman haruslah mengacu ke beban



Gambar.2-20. Roda gigi

J = inersia =kelebaman ; T = Torsi ; ω = kecepatan sudut

α =percepatan sudut; N =jumlah gigi; J_2 = inersia motor mengacu ke sisi beban

Dari gambar diatas dapat dikatakan bahwa daya mekanik yang masuk ke sistem roda gigi sama dengan daya mekanik yang keluar pada sisi beban.

$$T_M \omega_M = T_L \omega_L \text{ dan } \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_L}{\omega_M} = \frac{\alpha_L}{\alpha_M}$$

Dimana :

$$\alpha_L = T_L/J_2 \quad ; \quad \alpha_L = \text{Percepatan sisi beban}$$

$$T_L = \text{Torsi Beban}$$

$$J_2 = \text{Inersia sisi Beban}$$

$$\alpha_M = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \times \frac{T_M}{J_2}$$

dimana T_M adalah Torsi mekanik output. Dan Inersia total dari sisi beban adalah

$$J_T = J_L + J_M \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Dimana J_M adalah inersia motor.

Dengan demikian percepatan beban (α_L) menjadi :

$$\alpha_L = \frac{(N_2 / N_1) \cdot T_M}{J_L + J_M (N_2 / N_1)^2}$$

Untuk beban percepatan beban maksimum perbandingan roda gigi didapat :

$$\frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{J_L}{J_M}}$$

2.2.5 Magnetik Amplifier

Ada bermacam-macam penguat listrik. Jenis yang dapat beroperasi secara kontinu dibagi kedalam tiga bentuk :

- Elektronik : Digunakan untuk sistem berdaya rendah baik AC maupun DC.
- Rotari : Dikategorikan kedalam penguat elektronika, misalnya metadyne dan amplidyne untuk pemakaian kilowatt.
- Magnetik : Penguat ini beroperasi untuk pemakaian daya besar dan kecil, bentuknya sederhana dan reliabel. Pemakaian frekuensi 50 Hz – 5 KHz.

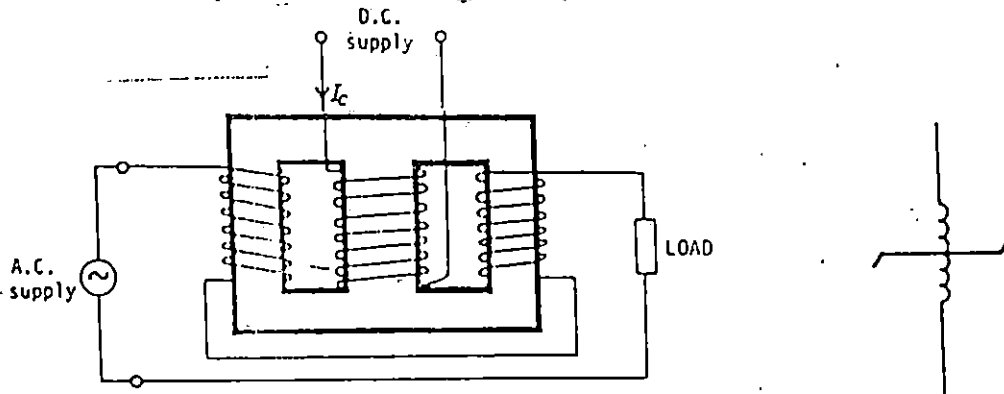
Jenis diskontinu terdiri dari pengaturan thyristor, penguat ignitron dan thyatron. Cocok untuk pemakaian daya yang besar. Bahagian ini menjelaskan magnetik amplifier sebagai penguat.

2.2.5.1. Prinsip Kerja

Magnetik amplifier disebut juga transduktor, bekerja berdasarkan pengaturan impedansi suatu induktor dengan aliran arus DC yang dilewatkan pada induktor lain.

Prinsip kerjanya dijelaskan dengan bantuan gambar 2.21. Kumputan yang dililit pada bahagian luar transformator dihubungkan seri berlawanan arah dan dihubungkan ke sumber AC sedangkan kumputan tengahnya dialiri arus DC. Saat

tidak ada aliran arus DC, fluks pada intinya sangat efektif dan tegangan yang dihasilkan kumparan AC sama dengan nol (0).



Gambar 2.21. Rangkaian Magnetik Amplifier

Ketika arus DC dialirkan fluks yang terbentuk pada inti akan mengurangi permeabilitas inti dan menurunkan induktansi serta impedansi pada kumparan AC. Akibatnya arus AC mengalir lebih banyak. Beban yang disambung seri dengan arus AC dapat diatur dengan pengaturan arus DC. Pengaruh dari pengaturan ini akan menggeser daerah kejenuhan inti besi yang akan mengubah permeabilitas inti besi.

Penguatan arus yang dilakukan magnetik amplifier ini dapat dibuat persamaannya seperti:

$$N_a I_a = N_c I_c, \text{ sehingga } \frac{I_c}{I_a} = \frac{N_a}{N_c}$$

Dimana N_a = Jumlah lilitan AC

N_c = Jumlah lilitan DC

I_a = Arus AC

I_c = Arus DC disebut juga arus kontrol.

Selama pengujian sebuah magnetik amplifier didapat data sebagai berikut

Contoh:

Arus Kontrol (mA)	-4	-3	-2	-1	0	0,5	1	2	4	4
Arus Beban (mA)	4	3	2	1	10	32	43	46,5	47,4	48

Tahanan rangkaian kontrol = 350Ω dan tahanan beban = 100Ω , hitunglah penguatan daya magnetik amplifier.

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

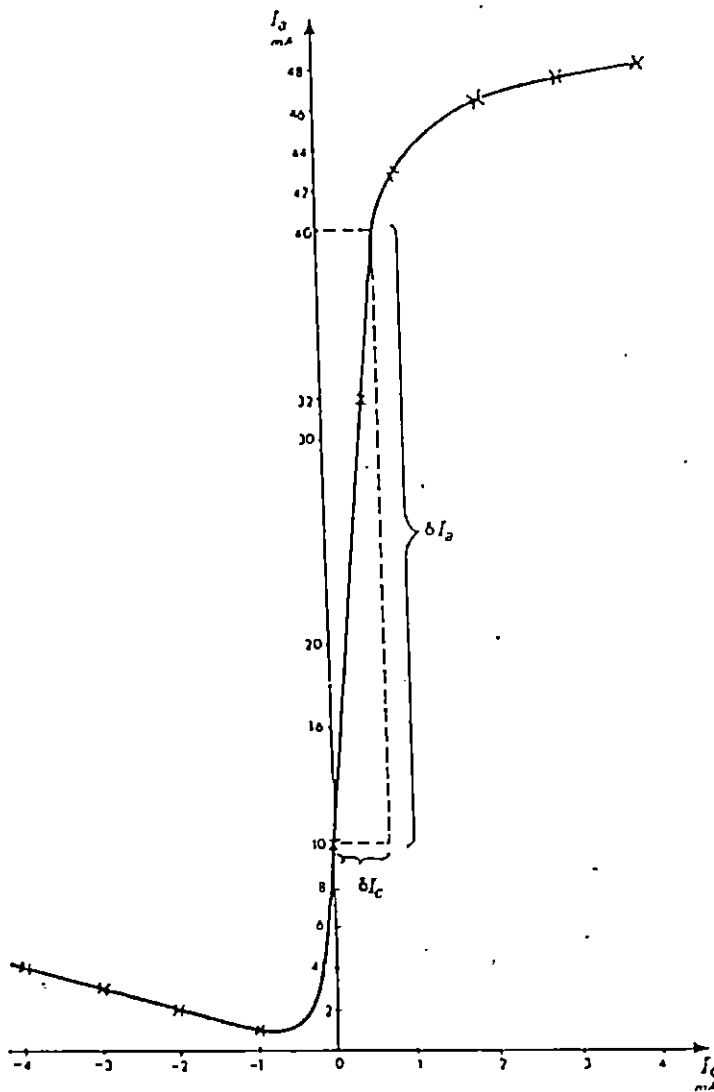


Fig. 4.8

Gambar 2.22. Karakteristik Penguatan Magnetik Amplifier

Penyelesaian :

Karakteristik data digambarkan pada gambar 2.22, garis linear pada grafik menunjukkan penguatan arus magnetik amplifier, maka

$$\frac{\delta I_o}{\delta I_c} = \frac{40 - 10}{0,7} = 42,9.$$

dan penguatan daya akan menjadi

$$\begin{aligned} \frac{P_o}{P_c} &= \frac{I_o^2 R_L}{I_c^2 R_c} = \left(\frac{I_o}{I_c} \right)^2 \times \frac{R_L}{R_c} \\ &= (42,9)^2 \times \frac{100}{350} = 525 \end{aligned}$$

Kesimpulan

Mutu suatu sistem pengaturan ditunjukkan oleh performansi sistem tersebut. Untuk alasan itu, pemilihan dan penggunaan komponen yang baik sangat menentukan keberhasilan sistem. Sistem pengaturan berfungsi untuk memperbaiki kinerja sistem yang sekaligus berperan sebagai sensor dan aktor. Sebagai sensor dipakai berbagai transduser. Secara umum transduser dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu transduser pasif dan aktif. Ada berbagai macam transduser yaitu jenis mekanik, thermal, optical, magnetik. Sebagai aktor, sistem memerlukan pula alat penggerak misalnya motor, generator, motorservo, dan roda gigi untuk sistem mekanik. Dalam memperbaiki kesalahan sistem diperlukan pemindah sinyal dan penguat. Biasanya sinyal ini perlu dikuatkan oleh amplifier. Penguat listrik dapat pula dibagi kedalam bentuk penguat elektronik, rotary (misalnya metadyne dan amplidyne) dan penguat magnetik (misalnya magnetik amplifier).

Bahan Bacaan

Jacob.J Michael, *Industrial Control Electronics*, 1989, , Prentice Hall, Inc,
New Jersey hal. 81-138.

Morris, Noel.M. *Control Engineering*, 1974., Mc Graw-Hill Book
Company, London, UK , hal. 14 – 25.

Pakpahan. S, *Kontrol otomatis (Teori dan Penerapan)* , 1988., Pener-
bit Airlangga, Jakarta hal. 25 – 49.

Yousefzadeh, *Basic Control Engineering*, 1979, Longman Scientific &
Technical, London. , hal.19 – 75

Soal-Soal Latihan

1. Buatlah bagan dari konstruksi transduser berikut ini
 - a. sinkro
 - b. drag-tachogenerator
 - c. LVDT

Berikan contoh pemakaian masing-masing di industri pada sistem pengaturan.

2. Sebutkan faktor-faktor yang mempengaruhi linearitas dan resolusi sebuah
3. potensiometer yang dipakai dalam sistem pengaturan.
4. Sebuah potensiometer rotari linear dengan bentangan 344 disambungkan ke sumber 15 Volt dc yang stabil. Hitunglah a). Konstanta potensiometer dalam volt/radian dan b). tegangan output apabila beban $100\text{ k}\Omega$ dihubungkan ke kontak gesernya dan diskusikan pula kesalahan yang terjadi akibat pembebanan itu.
5. Gambarkan sketsa konstruksi sebuah strain gauge terikat. Jelaskan bahan yang dipakai dan prinsip kerjanya. Tindakan apa yang harus dilakukan untuk mencegah suhu ambient yang terjadi pada strain gauge itu?
6. Sebuah strain gauge diikatkan pada sebatang besi yang panjangnya 10cm, penampangnya 4 cm. Modulus elastisitas besi $20,7 \times 10^{10}\text{ N/m}$. Tahanan nominal strain gauge (sebelum ditekan) = $240\ \Omega$ dan faktor gauge adalah 2,20. Apabila ia dibebani maka tahanan berubah sebesar $0,013\ \Omega$. Hitunglah perubahan panjang batang besi besarnya gaya yang diberikan.

BAB III TRANSFORMASI LAPLACE

Transformasi Laplace adalah proses mengubah fungsi $f(t)$ dari fungsi waktu ke fungsi kompleks $F(s)$ dari operator kompleks. Metode ini dapat digunakan secara mudah untuk menyelesaikan persamaan diferensial linear. Transformasi Laplace dapat dipakai untuk melihat respons sebuah sistem dalam keadaan transien dan keadaan tunak.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini, anda dapat :

1. Memindahkan fungsi waktu $f(t)$ ke dalam fungsi Laplace $F(s)$.
2. Menyelesaikan soal-soal dengan metode transformasi Laplace balik.
3. Menguraikan tanggapan sistem dengan menggunakan transformasi Laplace dan diagram balok.

3.1. Transformasi Laplace Sederhana

Transformasi Laplace hanya dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan diferensial yang mempunyai parameter/konstanta yang konstan dan variabel-variabelnya merupakan fungsi waktu. Untuk mendapatkan bentuk transformasi tanpa menggunakan tabel, diperlukan tiga langkah kerja yaitu :

1. Tentukan fungsi waktunya
2. Kalikan dengan faktor e^{-st} , faktor akan mempunyai harga nol bila t menuju tak berhingga.
3. Integrasikan bentuk perkalian itu terhadap waktu antara $t = 0$ dan $t = \infty$

Ketiga langkah tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mathcal{L} [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt = F(s)$$

\mathcal{L} = simbol transformasi Laplace

Contoh 3.1

Tentukan transformasi laplace untuk fungsi e^{-at}

Jawab :

$$f(t) = e^{-at}$$

$$\mathcal{L}[e^{-at}] = \int_0^{\infty} e^{-at} \cdot e^{-st} dt$$

$$\int_0^{\infty} e^{-(a+s)t} dt = \left[-\frac{1}{a+s} e^{-(a+s)t} \right]_0^{\infty}$$

$$\left[-\frac{1}{a+s} e^{-(a+s)t} \right]_{\infty} - \left[-\frac{1}{a+s} e^{-(a+s)0} \right]$$

$$\frac{1}{a+s}$$

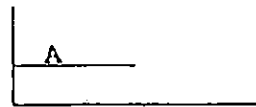
$$\text{Jadi } F(s) = \frac{1}{a+s}$$

3.2 Pemakaian Transformasi Laplace

a. Untuk fungsi unit tangga $f(t) = 0 ; t < 0$

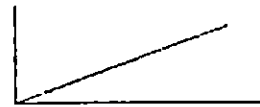
$$= A ; t \geq 0$$

$$\text{maka : } \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} A e^{-st} dt = \frac{A}{s}$$



b. Fungsi Ramp

$$F(t) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} A t e^{-st} dt = \frac{1}{s^2}$$

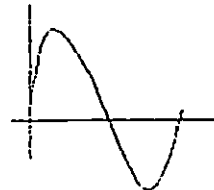


c. Fungsi Sinusoida

$$F(t) = \sin \omega t$$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}[\sin \omega t] = \int_0^{\infty} \sin \omega t e^{-st} dt$$

$$= \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$



3.3 Ciri-ciri Transformasi Laplace

1. Penjumlahan dan Pengurangan

$$f_1(t) \pm f_2(t) = F_1(S) \pm F_2(S)$$

2. Perkalian dengan bilangan konstan

$$\mathcal{L}\{kf_1(t)\} = kF(S)$$

3. Transformasi turunan langsung

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = SF(S) - f(0^+)$$

Dimana $f(0^+)$ harga awal $f(t)$ diuji pada $t \rightarrow 0$ dari daerah positif. Transformasi laplace turunanya ke n dari sebuah fungsi :

$$\mathcal{L} \frac{d^n f}{dt^n} = S^n F(S) - S^{n-1} f(0^+) - S^{n-2} f'(0^+) - \dots - f^{(n-1)}(0^+)$$

dimana $f(0^+)$ adalah turunan pertama dari $f(t)$ pada $t = 0^+$. Notasi $f^{(n-1)}(0^+)$ menunjukkan turunan ke $(n-1)$ pada $t = 0^+$.

4. Transformasi integral langsung

$$\mathcal{L} \left[\int_0^t f(t) dt \right] = \frac{F(S)}{S} + \frac{1}{S} \left[\int_0^t f(t) dt \right]_{t=0^+}$$

5. Pergeseran waktu

$$\mathcal{L}\{f(t-T)u(t-T)\} = F(S)e^{-sT}$$

6. Teorema nilai awal

Apabila $f(t)$ dan $df(t)/dt$, keduanya dapat ditransformasikan dengan integral laplace dan jika $\lim_{s \rightarrow 0} SF(S)$ ada, maka :

$$s \rightarrow 0$$

$$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} SF(S)$$

7. Teorema nilai akhir

Apabila transformasi laplace $f(t) \rightarrow F(S)$ dan $SF(S)$ adalah analisis pada sumbu khayal dan berada pada bahagian kanan, maka nilai akhir fungsi waktu adalah :

$$\lim_{s \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} SF(S)$$

contoh 3.2 Carilah Transformasi laplace dari :

$$f(t) = 5 + 4e^{-2t}$$

$$\text{Jawab : } f(s) = \mathcal{L}[5 + 4e^{-2t}]e^{-st} dt$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{\infty} 5 e^{-st} dt + \int_0^{\infty} 4 e^{-(s+2)t} dt \\
 F(s) &= \frac{5}{s} [e^{-st}]_0^{\infty} + \frac{4}{s+2} [e^{-(s+2)t}]_0^{\infty} \\
 &= \frac{5}{s} + \frac{4}{s+2} = \frac{9s+10}{s(s+2)} \\
 \text{jadi } F(s) &= \frac{9s+10}{s(s+2)}
 \end{aligned}$$

Contoh 3.3. Carilah Transformasi laplace dari :

$$F(t) = \cos \omega t$$

Jawab :

$$\begin{aligned}
 \cos \omega t &= \frac{1}{2} [e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}] \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \cdot e^{-st} dt \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{e^{-(s-j\omega)t}}{2} dt + \int_0^{\infty} \frac{e^{-(s+j\omega)t}}{2} dt \\
 &= \frac{-1}{2(s-j\omega)} [e^{-(s-j\omega)t}]_0^{\infty} + \frac{-1}{2(s+j\omega)} [e^{-(s+j\omega)t}]_0^{\infty} \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(s-j\omega)} + \frac{1}{(s+j\omega)} \right] = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \\
 \text{jadi } F(s) &= \frac{s}{s^2 + \omega^2}
 \end{aligned}$$

Contoh 3.4. Hitunglah Transformasi laplace dari :

$$f(t) = [e^{-4t} + 3e^{-2t}] = f_1(t) + f_2(t)$$

Jawab :

$$\begin{aligned}
 f_1(t) &= f(e^{-4t}) \rightarrow F_1(s) = \frac{1}{s+4} \\
 f_2(t) &= f(3e^{-2t}) \rightarrow F_2(s) = \frac{3}{s+2} \\
 F(s) &= F_1(s) + F_2(s) \rightarrow \frac{1}{s+4} + \frac{3}{s+2} \\
 F(s) &= \frac{4s+14}{(s+4)(s+2)}
 \end{aligned}$$

Transformasi laplace balik adalah suatu proses matematis mengubah fungsi $F(s)$ dari variabel kompleks menjadi fungsi variabel waktu $f(t)$. Secara matematis ditulis sebagai berikut :

$$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = f(t)$$

$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\}$ adalah Transformasi Laplace Balik $F(s)$

Salah satu cara mencari transformasi laplace balik digunakan metode residu dan partial. Metode ini dapat menghasilkan transformasi balik secara langsung tanpa bantuan tabel.

Contoh 3.5. Tentukan transformasi balik dari :

$$F(s) = \frac{20}{s(s+6)(s+8)}$$

Jawab :

$$F(s) = \frac{20}{s(s+6)(s+8)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{(s+6)} + \frac{C}{(s+8)}$$

$$A = sF(s) \Big|_{s=0} = \frac{20}{(s+6)(s+8)} \Big|_{s=0} = \frac{5}{12}$$

$$B = (s+6)F(s) \Big|_{s=-6} = \frac{20}{s(s+8)} \Big|_{s=-6} = -\frac{5}{3}$$

$$C = (s+8)F(s) \Big|_{s=-8} = \frac{20}{s(s+6)} \Big|_{s=-8} = \frac{5}{4}$$

Substitusikan nilai A, B, dan C maka

$$F(s) = \frac{5/12}{s} - \frac{5/3}{(s+6)} + \frac{5/4}{(s+8)}$$

Dengan menggunakan tabel lampiran 2 didapat

$$\begin{aligned} f(t) &= \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = 5/12 \cdot 5/3 \cdot e^{-6t} + 5/4 \cdot e^{-8t} \\ &= 5/12 [1 - 4e^{-6t} + 3e^{-8t}] \end{aligned}$$

Contoh 3.6. Carilah Transformasi Laplace Balik dari

$$F(s) = \frac{s^2 + 6s + 12}{(s+3)(s+4)^3}$$

dengan menggunakan metode a. Partial fraction

b. Residu

$$\text{Jawab : } F(s) = \frac{s^2 + 6s + 12}{(s+3)(s+4)^3} = \frac{A}{(s+3)} + \frac{B_3}{(s+4)^3} + \frac{B_2}{(s+4)^2} + \frac{B_1}{(s+4)}$$

$$A = (s+3)F(s) / s = -3 = \frac{s^2 + 6s + 12}{(s+4)^3} / s = -3 = 3$$

$$B_3 = (s+4)^3 F(s) / s = -4$$

$$B_2 = \frac{d}{d_1} = \frac{s^2 + 6s + 12}{(s+3)} / s = -4 = -2$$

$$B_1 = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{d_1^2} = \frac{s^2 + 6s + 12}{(s+3)} / s = -4 = -3$$

$$F(s) = \frac{3}{(s+3)} - \frac{4}{(s+4)^3} - \frac{4}{(s+4)^2} - \frac{3}{(s+4)}$$

$$f(t) = 3e^{-3t} - 2t^2 e^{-4t} - 2te^{-4t} - 3e^{-4t} \\ = 3e^{-4t} - e^{-4t} [2t^2 + 2t + 3]$$

3.5 Penerapan Transformasi Laplace

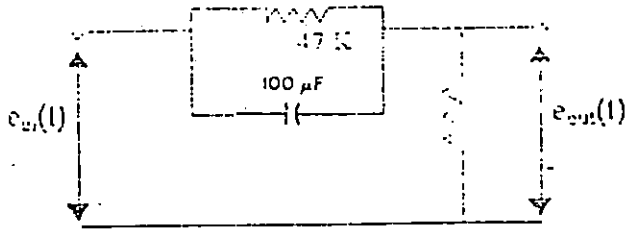
Metode penyelesaian persamaan diferensial dengan menggunakan transformasi laplace memudahkan kita untuk menyelesaikan setiap persamaan-persamaan yang rumit, asalkan persamaan-persamaan tersebut linier dan konstan terhadap waktu.

Langkah-langkah yang diperlukan untuk menyelesaikan persamaan diferensial dengan transformasi laplace adalah :

1. Menuliskan persamaan diferensial sistem.
2. Menuliskan transformasi laplace dengan teorema yang sesuai
3. Untuk menentukan solusi dalam fungsi t, gunakan transformasi balik dengan menggunakan tabel transformasi.

a. Sistem Elektris

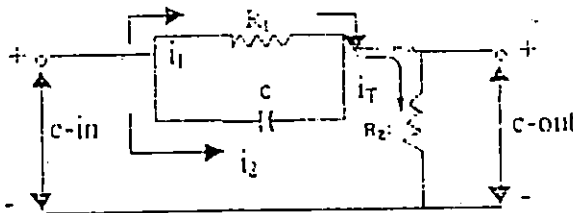
Suatu sistem terdiri dari R1, R2, C dan sumber listrik arus searah seperti pada gambar 3-1.



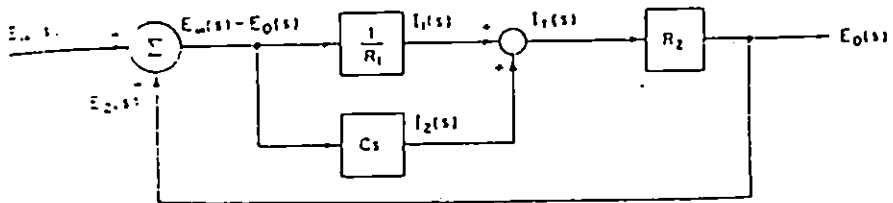
Carilah tegangan output $e_o(t)$ bila input dc sebesar E volt dengan tiba-tiba diberikan pada rangkaian di atas.

Penyelesaian

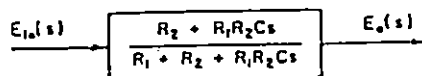
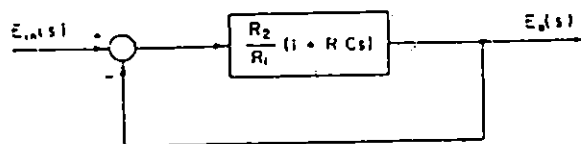
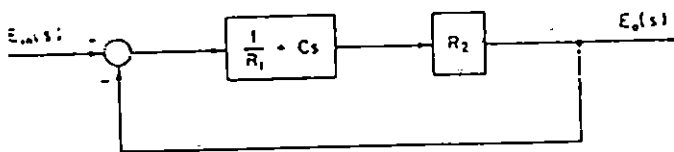
Pertama-tama sistem listrik ini dipindahkan ke dalam bentuk diagram blok agar didapat fungsi alih sistem seperti contoh ini.



apabila $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_T(t)$ adalah arus-arus yang mengalir pada rangkaian dan $I_1(s)$, $I_2(s)$, $I_T(s)$ adalah bentuk laplacenya, maka rangkaian ini dapat dinyatakan dengan diagram balok di bawah ini.



Dimana $E_{in}(s)$ dan $E_o(s)$ adalah bentuk-bentuk laplace $e_{in}(t)$ dan $e_o(t)$. Penyempurnaan diagram blok di atas memberikan :



Sehingga fungsi alihnya :

$$\frac{E_o(s)}{E_{in}(s)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + R_1 C_2 s}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C s}$$

atau
$$\frac{E_o(s)}{E_{in}(s)} = K \cdot \frac{1 + \tau_1 s}{1 + K \tau_1 s}$$

dimana
$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.68$$

$$\tau_1 = R_1 C = 4.7 \text{ sec}$$

$$K \tau_1 = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} = 3.2 \text{ sec}$$

karena
$$E_{in}(s) = \frac{E}{s}$$

maka
$$E_o(s) = 0.68E \cdot \frac{1 + 4.7s}{s(1 + 3.2s)}$$

Dengan menggunakan metoda parsial diperoleh

$$\frac{1 + 4.7s}{s(1 + 3.2s)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{1 + 3.2s}$$

mana A dan B akan ditentukan dengan menyamakan koefisien dengan pangkat s yang

$$\frac{1 + 4.7s}{s(1 + 3.2s)} = \frac{A(1 + 3.2s) + Bs}{s(1 + 3.2s)}$$

Selanjutnya
$$1 + 4.7s = A(1 + 3.2s) + Bs = A + (B + 3.2A)s$$

Dari sini
$$A = 1$$

dan
$$B = 4.7 - 3.2 = 1.5$$

$$E_o(s) = 0.68E \left[\frac{1}{s} + \frac{1.5}{1 + 3.2s} \right]$$

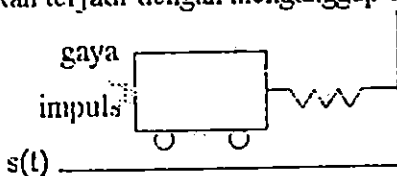
Dengan menggunakan tabel 5.1 akan diperoleh :

atau
$$\mathcal{L}^{-1}[E_o(s)] = e(t) = 0.68E(1 + 0.47e^{-113.2t})$$

$$e_o(t) = 0.68E + 0.32Ee^{-113.2t}$$

Contoh 3.7

Tinjau sistem mekanik seperti pada gambar 3-2 dan selidikilah getaran yang akan terjadi dengan menganggap bahwa sistem tersebut mula-mula diam.



Penyelesaian :

Sistem dikuatkan dengan input impuls sehingga persamaannya menjadi :

$$MX + Kx = \zeta(x)$$

Kedua ruas ditransformasi-laplacekan :

$$M[s^2X(s)] - \zeta X(0) - X(0) + KX(s) = 1$$

Dengan memasukkan kondisi mula $X(0)$, dan $X(0) = 0$, maka didapat :

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 + K}$$

Jadi, osilasi yang timbul adalah getaran selaras sederhana dengan amplitudo =

$$\frac{1}{\sqrt{mk}}$$

Kesimpulan

Transformasi laplace sangat bermanfaat untuk menyelesaikan persamaan-persamaan diferensial yang menjelaskan tingkah laku sebuah sistem. Persamaan diferensial yang ditransformasikan tersebut dilukiskan dalam variabel kompleks S . Hasil dari transformasi ini murni merupakan bentuk aljabar sehingga memudahkan mencari besaran yang akan dicari sebagai suatu ukuran dari fungsi kompleks.

Untuk mendapatkan hasil murniya, persamaan tersebut perlu dikembalikan pada fungsi waktu, dengan cara melakukan transformasi laplace balik. Biasanya tersedia beberapa fungsi transformasi laplace yang penting dalam tabel lengkap dengan transformasi laplace balik $f(t)$.

Bahan Bacaan

1. Edi Laksono, "teknik Kontrol Automatik, Jilid 1", (1980). Penerbit : Erlangga, Jakarta hal. 20-51.
2. Karyadi, "Transformasi laplace". (1983). Penerbit : Usaha Nasional, Surabaya
3. PEDC, "Sistem Penyaluran PEDC". (1984). Bandung Bab V hal. 1-15

1. Carilah transformasi laplace fungsi berikut

a. $\frac{d^2 y}{dt^2} + 5 \frac{dy}{dt} + 3y = 10$

b. $M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = 3:$

2. Carilah transformasi balik persamaan berikut

a. $F_A(s) = \frac{20}{(s+2)^2(s^2+12s+16)}$

b. $F_B(s) = \frac{10(s+2)}{s^2-16)(s+1)}$

c. $F_C(s) = \frac{2(s+1)}{s(s^2+8s+4)}$

3. Sebuah rangkaian RLC seri, $R = 632 \text{ K}\Omega$, $C = 0,002 \text{ }\mu\text{F}$, $L = 20 \text{ mH}$ dan $E = 10 \text{ V}$, gambarkanlah grafik $I = f(t)$

BAB IV

MODEL MATEMATIKA SISTEM FISIK

Sebuah sistem fisik merupakan kumpulan objek yang berbentuk fisik untuk satu tujuan, misalnya yang dipakai pada industri, labor dan sistem elektronika, yang terdiri dari beberapa komponen, pengaturan mekanik sistem uap, satelit komunikasi, dan lain-lain.

Karena sistem yang ditinjau berada dalam keadaan dinamis dan berubah-ubah maka untuk mencari hubungan antara variabel sistem perlu dicari model matematisnya. Persamaan yang bisa dipakai adalah persamaan differensial. Apabila persamaan itu dapat dibuat linear maka digunakan Transformasi laplace. Karena itu, perlu mempertimbangkan suatu sistem fisik, membuat asumsi pengendalian, dan melinearkan sistem tersebut. Sifat yang paling penting dari sistem linear adalah berlakunya prinsip superposisi yang menyatakan bahwa respon yang dihasilkan oleh penggunaan secara serentak dua buah fungsi penggerak yang berbeda sama dengan jumlah dari dua buah respon individualnya.

Disamping itu kita dapat menggunakan blok diagram untuk melihat operasi matematis yang terdapat pada sebuah sistem. Dapat dikatakan bahwa diagram blok dengan matematis sistem penyaluran saling berhubungan karena diagram blok merupakan suatu cara untuk menggambarkan sebuah persamaan differensial.

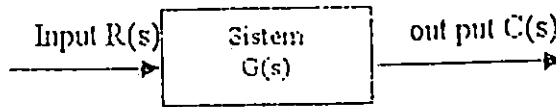
TUJUAN

Setelah mempelajari bab ini anda dapat :

1. Memahami maksud fungsi alih, blok diagram, dan grafik aliran sinyal
2. Menyederhanakan blok diagram dan GAS dari suatu sistem pengaturan.
3. Menentukan fungsi alih pada sistem pengaturan proses lup tertutup dan sistem pengaturan lup tertutup pada sistem servo

4.1. Fungsi Alih

Dengan menggunakan transformasi laplace dapat ditentukan perbandingan antara output dan input sebagai fungsi $-s$ dari sistem linear parameter konstan. Dengan anggapan bahwa semua syarat awal adalah nol.



Gambar. 4-1. Blok diagram sederhana sistem linear

Dari diagram blok sistem sederhana pada gambar di atas dengan pertimbangan diasumsikan bahwa output dan input dihubungkan oleh persamaan diferensial linear dengan koefisien konstan dan ditulis dalam bentuk :

$$A_n \frac{dnC}{dt^2} + \dots + A_1 \frac{dnC}{dt} + A_0 C = B_m \frac{dm\sigma}{dt^m} + \dots + B_1 \frac{dm\sigma}{dt} + A_0 \sigma$$

Dari anggapan bahwa kondisi awal sistem adalah nol, maka transformasi laplace dapat dituliskan :

$$(A_n S^n + \dots + A_1 S + A_0) C(s) = (B_m S^m + \dots + B_1 S + B_0) R(s)$$

Perbandingan $C(s)/R(s)$ disebut fungsi alih dan dapat dinyatakan dengan :

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{B_m S^m + \dots + B_1 S + B_0}{A_n S^n + \dots + A_1 S + A_0}$$

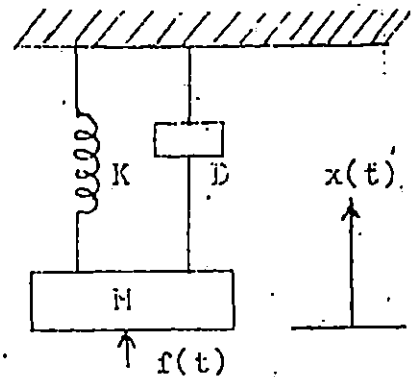
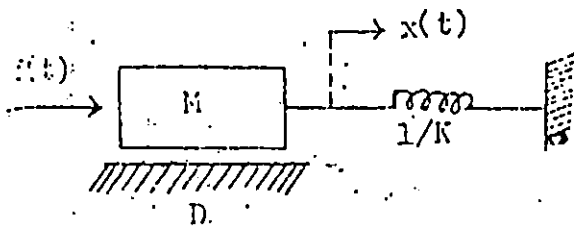
Oleh sebab itu dengan menganggap kondisi awal adalah nol, maka transformasi laplace outputnya adalah :

$$C(s) = G(s)R(s)$$

Fungsi alih $G(s)$ hanya merupakan elemen sistem dan tidak tergantung pada kondisi awal dengan penguatan sistem. Selanjutnya fungsi alih dapat digunakan untuk memperlihatkan lup tertutup maupun lup terbuka.

Dalam bab ini hanya dibicarakan beberapa contoh dari fungsi alih sistem seperti sistem mekanik, rotasi mekanik, Gir mekanik, rangkaian LRC dan motor arus searah dengan medan tetap.

Gambar 4-2. a menunjukkan sistem translasi dari rangkaian mekanik dengan masa M , koefisien gesekan D , Koefisien elastisitas $1/K$.



dan $x(t)$ = simpangan.

Menurut hukum Newton dan Hook, maka dalam keadaan seimbang :

$$F(t) = M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx$$

Dengan transformasi Laplace, menjadi :

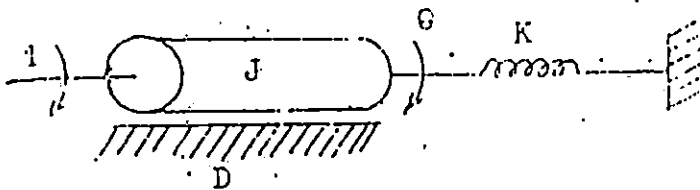
$$F(s) = Ms^2X(s) + DsX(s) + KX(s)$$

Maka fungsi alih menjadi

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Ds + K}$$

4.1.2. Sistem Rotasi

Secara ideal diperlihatkan oleh gambar 4.3. yang menunjukkan sistem rotasi dari rangkaian mekanis, dengan momen inertiya J , koefisien gesekan D , koefisien elastisitas $1/k$.



Dimana : T = momen puter (torque), Q = penyimpangan sudut

Gambar 4.3. Sistem Rotasi

Menurut Hukum Newton dan Hook, maka dalam keadaan seimbang :

$$T(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + k\theta$$

Menggunakan transformasi Laplace :

$$T(s) = Js^2 \theta(s) + Ds \theta(s) + K \theta(s)$$

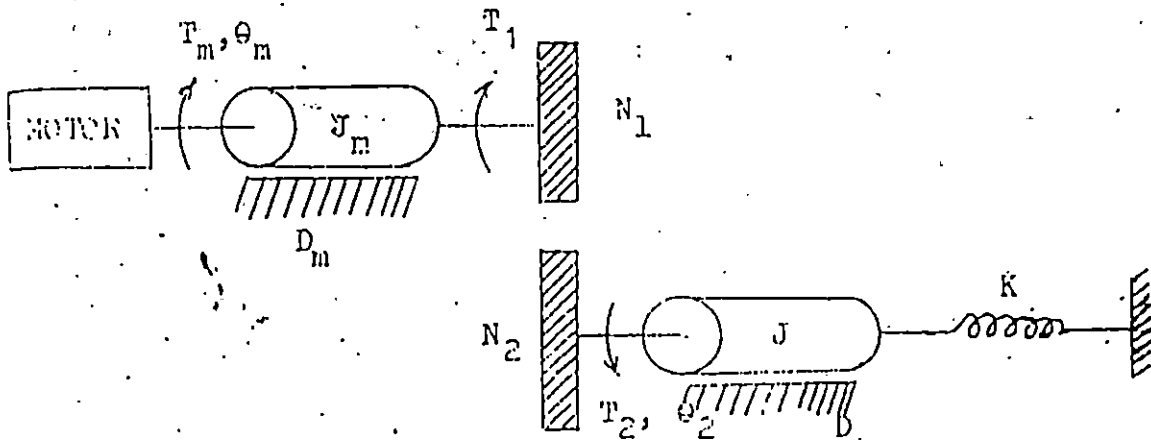
Maka fungsi alih menjadi

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js^2 + Ds + K}$$

4.1.3. Gir Mekanis

Seringkali dalam praktek kita temui bahwa antara motor dan beban tidak dihubungkan secara langsung, tetapi melalui gir mekanis. Hal mana dimaksudkan untuk penyesuaian (matching) dan untuk mengatur konstanta waktu dari motor dan beban.

Gambar 4.4. menunjukkan rangkaian motor dan beban melalui gir mekanis dengan perbandingan gir $N = N_1/N_2$.



Gambar 4.4. Gir Mekanis

Dimana : T_m = Torque dari motor

J_m = momen inertia motor

T_2 = Torque pada beban

D_m = koefisien gesekan motor

N_1 = Jumlah gigi gir ke 1

J = Momen inertia beban

N_2 = Jumlah gigi gir ke 2

D = Koefisien gesekan beban

Dalam keadaan setimbang, persamaan dari pihak motor dan pihak beban dapat ditulis sebagai berikut :

$$T_m = T_1 + (J_m s^2 + D_m s) \theta_m$$

Dan

$$T_2 = (J s^2 + D s + K) \theta_2$$

Misalkan $r_1 =$ jari-jari gir ke 1 dan $r_2 =$ jari-jari gir ke 2, maka oleh karena penyimpangan liner dari kedua gir sama :

$$\theta_1 r_1 = \theta_2 r_2$$

Dan bila jumlah gigi berbanding lurus dengan jari-jari, maka persamaan menjadi :

$$\theta_1 N_1 = \theta_2 N_2$$

Atau $\theta_2 = N \theta_1$ dimana : $N = \frac{N_1}{N_2}$

Kerja yang dilakukan oleh kedua gir sama, maka :

$$T_1 \theta_1 = T_2 \theta_2 \quad \text{atau} \quad T_1 = N T_2$$

Substitusikan persamaan-persamaan di atas maka didapat :

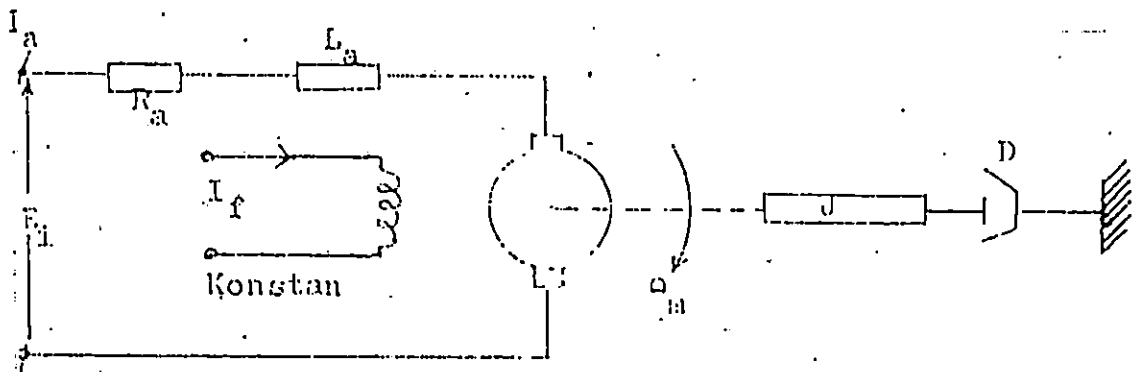
$$T_m = [(J_s S^2 + D_s + K) N^2 + (J_m S^2 + D_s)] \theta_1$$

Bentuk fungsi alih adalah

$$\frac{\theta_2}{T_m} = \frac{N_1 / N_2}{(J_s S^2 + D_s + K) N^2 + (J_m S^2 + D_s)}$$

4.1.4. Motor Arus searah dengan medan konstan

Gambar 4.5. menunjukkan rangkaian motor searah dengan medan konstan, input dalam hal ini mempunyai besaran elektris dan output adalah bearan mekanis.



Gambar 4.5. Motor DC (Arus searah) dengan medan konstan

Dimana :

- | | | | |
|-------|------------------------------|------------|----------------------|
| E_i | = Tegangan input pada stator | I_a | = Arus pada jangkar |
| R_a | = Tahanan stater (jangkar) | θ_m | = Penyimpangan sudut |

Pada rangkaian stator didapat persamaan

$$E_i = (Ra + sLa)I_a + K_b \cdot \omega$$

Dimana :

$$\omega = \text{Putaran motor} = s \cdot \theta_m$$

$$K_b = \text{Konstanta ggl lawan}$$

Torsi (moment putar) yang dihasilkan sebuah motor ideal :

$$T_d = K_m \cdot I_a$$

Dimana

$$K_m = \text{Konstanta motor (Kgm/amp)}.$$

Torsi yang digunakan untuk menggerakkan beban yang terdiri dari momen inersia dan gesekan adalah

$$T_a = (Js^2 + Ds) \cdot \theta_m$$

Dimana

$$J = \text{Momen inersia beban}$$

$$D = \text{Koefisien gesekan beban}.$$

Dalam keadaan setimbang $T_d = T_a$ dan dari persamaan-persamaan di atas didapat fungsi alih motor DC dengan medan konstant adalah sebagai berikut :

$$G_m = \frac{\theta_m}{E_i} = \frac{K_m}{(Js^2 + Ds)(Ra + sLa') + sK_b \cdot K_m}$$

Dan La dapat diabaikan terhadap Ra dan ggl lawan $= sK_b K_m$ dapat diabaikan, maka

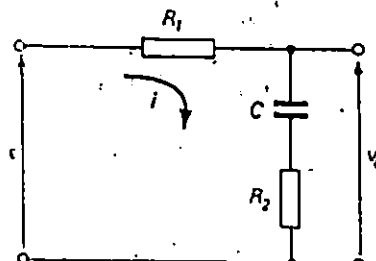
disederhanakan menjadi

$$\theta_m = \frac{K}{s(\tau_m s + 1)}$$

dimana

$$K = \frac{K_m}{Ra D} \quad \text{dan} \quad \tau_m = \frac{J}{D}$$

4.1.5. Phase-Lag Network



Gambar. 4.6. Phase-Lag Network

$$E_o = (R_2 + \frac{1}{sC}) \cdot I(s)$$

$$E_{in} = (R_1 + R_2 + \frac{1}{sC}) \cdot I(s)$$

$$T_1 = R_2 C$$

$$T_2 = (R_1 + R_2) \cdot C$$

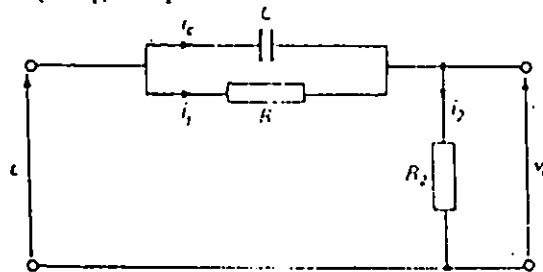
Maka fungsi alih menjadi :

$$G = \frac{E_o}{E_{in}} = \frac{sT_1 + 1}{sT_2 + 1}$$

4.1.6. Phase-Lead Network

Dari gambar 4.7 didapat persamaan :

$$E_{in} = (R_2 + \frac{1}{(1/R_1) + C_1}) \cdot I(s)$$



Gambar 4.7. Phase-Lead Network

$$E_o = R_2 \cdot I(s)$$

$$a = R_2 / (R_1 + R_2)$$

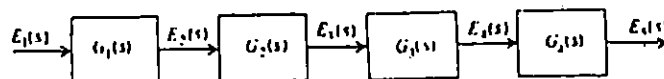
$$T = R_1 C_1$$

Maka fungsi alihnya menjadi

$$G = \frac{E_o}{E_{in}} = \frac{a(sT + 1)}{(sT + 1)}$$

4.2 Diagram Blok

Dari diagram blok sistem linear sederhana di atas didapat $C(s) = G(s)R(s)$. dari persamaan ini sebetulnya dapat dilihat bahwa $G(s)$ merupakan faktor pengendali terhadap masukan $R(s)$. apabila sebuah sistem yang beruntai seperti pada gambar 3-4 maka hubungan $G(s)$ terhadap input dan output adalah sebagai berikut.



$$E_2(s) = G_1(s) E_1(s)$$

$$E_3(s) = G_2(s) E_2(s)$$

$$E_4(s) = G_3(s) E_3(s)$$

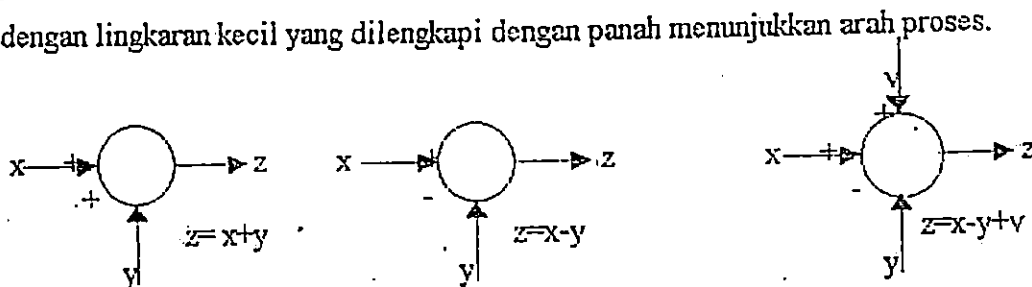
$$E_5(s) = G_4(s) E_4(s)$$

$$E_6(s) = G_5(s) E_5(s)$$

$$\text{Atau : } E_5(s) = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) + G_4(s) + G_5(s)$$

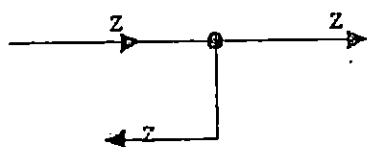
$$\text{dan } \frac{E_5(s)}{E_1(s)} = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) + G_4(s) + G_5(s)$$

Jadi berdasarkan uraian di atas, blok yang diserikan terjadi perkalian. Dalam sistem pengaturannya, sering ditemukan operasi penjumlahan atau pengurangan yang dinyatakan dengan lingkaran kecil yang dilengkapi dengan panah menunjukkan arah proses.

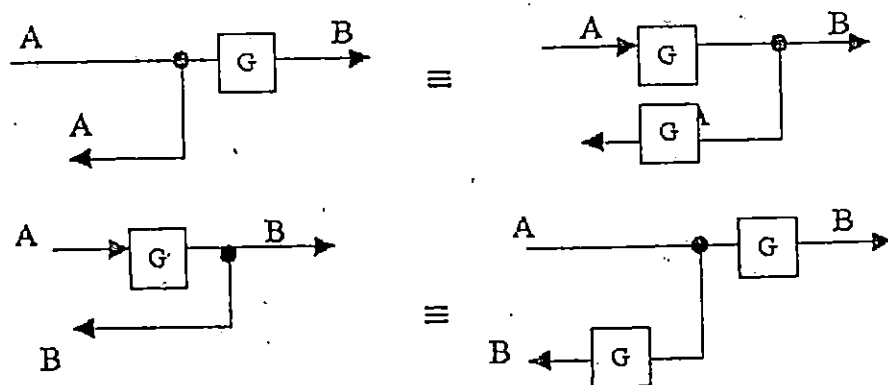


Gambar 4.8. Penjumlahan dan Pengurangan

Disamping itu akan ditentukan pula titik percabangan (pertalian), yaitu :



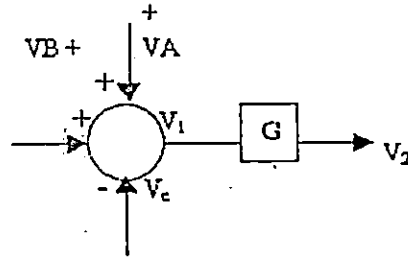
Biasanya digunakan untuk mengembalikan keluaran ke masukan, misalnya untuk feedback



Gambar 4. 9. Titik Percabangan

Di sini tidak terjadi penjumlahan, tetapi hanya merupakan lintasan ekstra sepanjang aliran signal.

Contoh :



$$V_1 = V_A + V_B - V_C$$

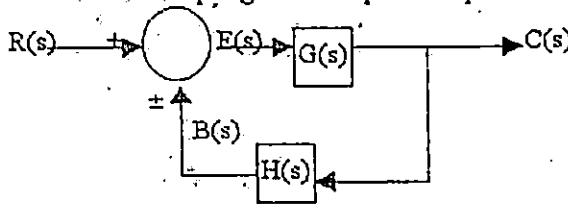
$$V_2 = V_1 G$$

$$= (V_A + V_B - V_C) G$$

Gambar 4.10. Gabungan titik penjumlahan dan pencabangan

Penyederhanaan diagram blok merupakan langkah penting dalam analisis sistem pengaturan. Hal ini merupakan suatu teknik dimana hasil akhir biasanya merupakan satu saja input dan output tetap yang sesuai dengan sebelumnya.

Perhatikan sistem pengaturan lup tertutup di bawah ini.



Gambar 4-11. Blok Diagram Sistem Feedback Lup Tunggal

Keterangan :

$R(s)$ = input acuan

$H(s)$ = feedback

$C(s)$ = output yang diatur

$G(s)$ = penguatan

$E(s)$ = signal kesalahan

Blok diagram ini menghasilkan persamaan :

$$B(s) = H(s) C(s)$$

$$E(s) = R(s) \pm B(s)$$

$$C(s) = G(s) E(s)$$

Dari ketiga persamaan ini akan menghasilkan fungsi alih sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \pm G(s)H(s)}$$

Untuk menyelesaikan blok diagram yang rumit, perlu dilakukan beberapa kali penyederhanaan diagram yaitu dengan cara memindahkan titik penjumlahan atau titik percabangan.

Transformasi	Diagram Asal	Diagram yang Setar
1. Mengkombinasikan balok secara bertingkat		
2. Menggerakkan titik penjumlahan di belakang balok		
3. Menggerakkan titik pemungutan di depan balok		
4. Menggerakkan titik pemungutan di belakang balok		
5. Menggerakkan titik penjumlahan di depan balok		
6. Memusnahkan jerat umpan balik		

Tabel 1. Transformasi Blok Diagram

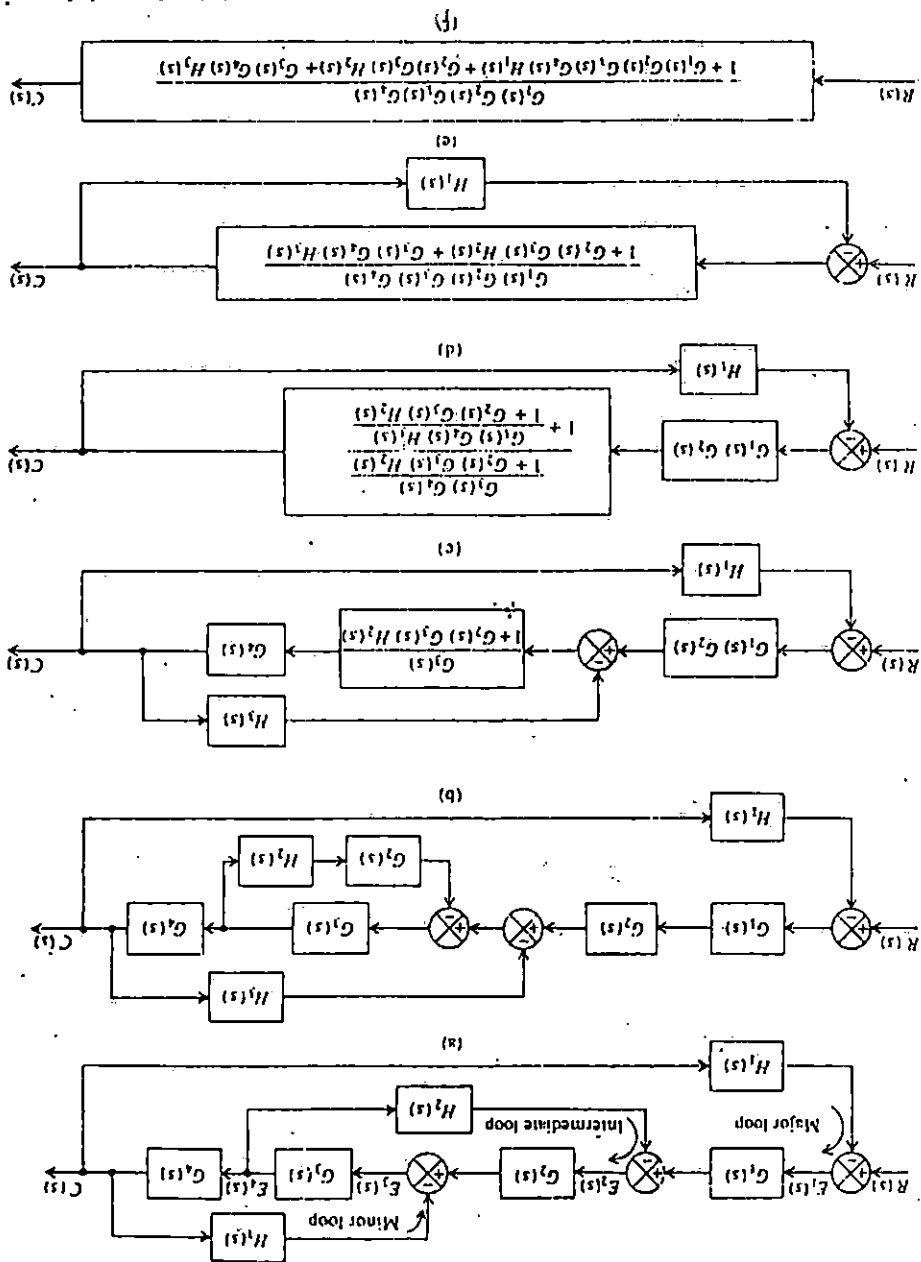
Tabel 1 menggambarkan beberapa transformasi yang dapat dipakai untuk menyederhanakan reduksi sistem feedback ganda.

Apabila terjadi feedback unity atau $H(s) = 1$, maka fungsi alih sistem menjadi :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \pm G(s)}$$

Dan apabila dapat dilakukan persamaan dari $1 + G(s)H(s) = 0$, berarti sistem akan stabil. Persamaan ini disebut persamaan karakteristik.

Contoh 4.1. Tentukan fungsi alih dari sistem ini



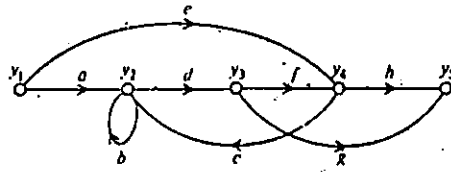
Gambar 4.11. Mereduksi sistem lup ganda dengan jalur kompleks

Keterangan :

- a. sistem asli
- b. memindahkan titik penjumlahan, lup minor dan intermediate.
- c. Reduksi lup ekuivalen intermediate
- d. Reduksi lup ekuivalen minor
- e. Ekuivalen sistem feedback
- f. Fungsi alih sistem.

4.3 Diagram Aliran Signal dan Teori Mason

Grafik aliran signal (GAS) dan teori Mason membantu para pelaksana kontrol menentukan respon sistem lup ganda linear yang rumit lebih cepat dari pada menggunakan teknik reduksi blok diagram. Perhatikan gambar di bawah :



Gambar.4-12.Diagram aliran signal

GAS merupakan penampilan dari suatu persamaan linear yang mempunyai bentuk :

$$Y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} Y_j \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Dalam diagram ini terdapat beberapa cabang dan simpul yang saling berhubungan.

Persamaan linearnya dapat dinyatakan dengan :

$$Y_2 = aY_1 + bY_2 + cY_4$$

$$Y_3 = dY_2$$

$$Y_4 = eY_1 + fY_3$$

$$Y_5 = gY_2 + hY_4$$

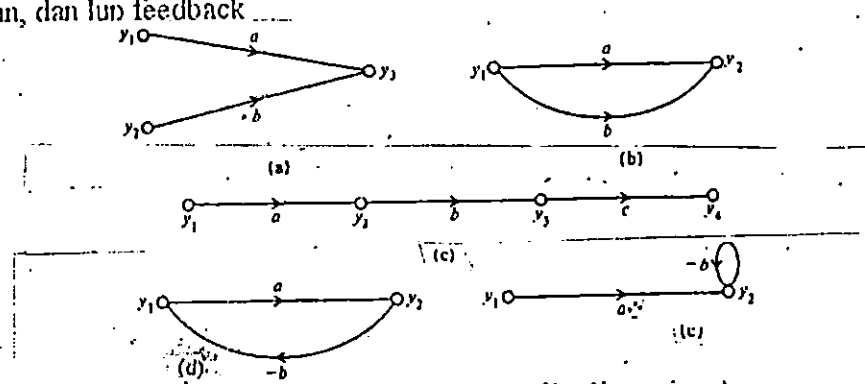
Di sini Y_1 berfungsi sebagai input dan Y_5 sebagai output, sehingga fungsi alihnya adalah Y_5/Y_1

Sebelum membahas GAS lebih lanjut, kita harus mendefinisikan beberapa istilah di bawah ini:

1. sumber : sebagai simpul yang hanya mempunyai cabang keluar seperti (Y_1)
2. Sink : sebagai simpul yang hanya mempunyai cabang kedalam (Y_2)
3. Lintasan : sekelompok cabang dengan arah yang sama seperti eh, adfh, dan b.
4. Lintasan maju : datang dari sumber dan berhenti pada sink dan sepanjang lintasan tidak boleh ada simpul yang menghambat lebih dari satu kali seperti ch, scdg, adg, dan adfh.
5. Lintasan penguatan: hasil kali transmitansi – transmitansi cabang lintasan maju.
6. Lup feedback : lup tertutup misalnya b, dan dfc

4.3.1. Reduksi Diagram Aliran Sinyal

Sama seperti reduksi blok diagram, GAS dapat direduksi dengan penjumlahan, perkalian, dan lup feedback



Gambar 4.13. Grafik aliran sinyal

- a. Penjumlahan : pada gambar a : $Y_2 = aY_1 + bY_2$
pada gambar b : $Y_2 = (a + b)Y_1$
- b. Perkalian : pers. Linear pada gambar c : $Y_4 = abcY_1$
- c. Lup feedback : 1. Pers. Linear pada gambar d : $Y_2 = (a/1+ab).Y_1$
2. Pers. Linear pada gambar e : $Y_2 = (a/1+b).Y_1$

Untuk grafik aliran signal yang lebih kompleks, rumus penguatan oleh Mason sangat bermanfaat untuk digunakan.

4.3.1. Rumus Penguatan Mason untuk GAS

Penampilan umum untuk grafik penguatan oleh Mason dinyatakan dalam bentuk rumus:

$$P = \frac{1}{\Delta} \sum_k P_k \Delta_k$$

dimana :

P_k = Penguatan atau transmitansi lintasan maju ke k

Δ = determinan grafik

= 1 - (jumlah semua penguatan lup yang berbeda) + (jumlah hasil kali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari dua lup yang tidak bersentuhan) - (jumlah hasil kali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari tiga lup yang tidak bersentuhan) +

$$= 1 - \sum_a L_a + \sum_{b,c} L_b L_c - \sum_{d,e,f} L_d L_e L_f + \dots$$

$\sum_a L_a$ = Jumlah dari semua penguatan lup yang berbeda

$\sum_{a,b} L_a L_b =$ Jumlah hasilkali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari dua lup

yang tidak bersentuhan

$\sum_{d,e,f} L_d L_e L_f =$ Jumlah hasilkali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari tiga lup

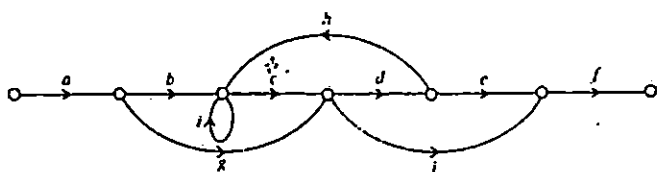
yang tidak bersentuhan.

$\Delta_k =$ kofaktor dari determinan lintasan maju ke k dengan menghilangkan lup-lup yang menyentuh lintasan maju ke k .

(Perhatikan bahwa penjumlahan dilakukan dengan mengambil seluruh lintasan yang mungkin dari masukan hingga keluaran.

Contoh 4.3.1.1

Tinjaulah fungsi alih sistem yang di tunjukkan pada gambar dengan menggunakan teori Mason.



Penyelesaian

$$\Delta = 1 (1 + cdh)$$

$$P_1 = abcdef \quad \Delta_1 = 1$$

$$P_2 = agdef \quad \Delta_2 = 1 - i$$

$$P_3 = agjf \quad \Delta_3 = 1 - i$$

$$P_4 = abcjf \quad \Delta_4 = 1$$

Jadi :

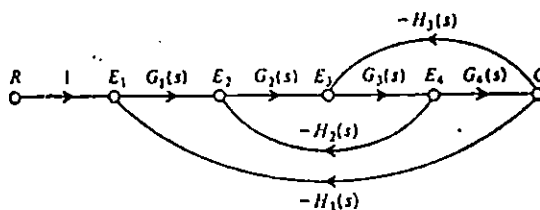
$$P = \frac{Abcdef + agdef(1-i) + agjf(1-i) + abcjf}{1 - (1 + cdh)}$$

Contoh 4.3.1.2

$$\Delta = 1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)H_1(s) + G_2(s)G_3(s)H_2(s) + G_3(s)G_4(s)H_3(s),$$

$$G_{11} = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s),$$

$$\Delta_{11} = 1.$$



$$\frac{C(s)}{R(s)} = G = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)H_1(s) + G_2(s)G_3(s)H_2(s) + G_3(s)G_4(s)H_3(s)}$$

Kesimpulan

Bab ini telah membahas langkah-langkah menyusun diagram blok dan menyederhanakan sistem dengan menggunakan grafik aliran sinyal menurut teori Mason. Hal ini dilakukan selain melihat metode yang lebih sederhana juga memperlihatkan bagaimana fungsi alih atau persamaan diferensial dari berbagai sistem diturunkan langkah demi langkah.

Bahan Bacaan

Jacob.J Michael, *Industrial Control Electronics*, 1989, Prentice Hall, Inc, New Jersey. p.

Ogata Katsuhiko dan Edi Leksono, *Teknik Kontrol Automatik (jilid 1)*, 1985, Penerbit Erlangga, Jakarta. hal 68-128

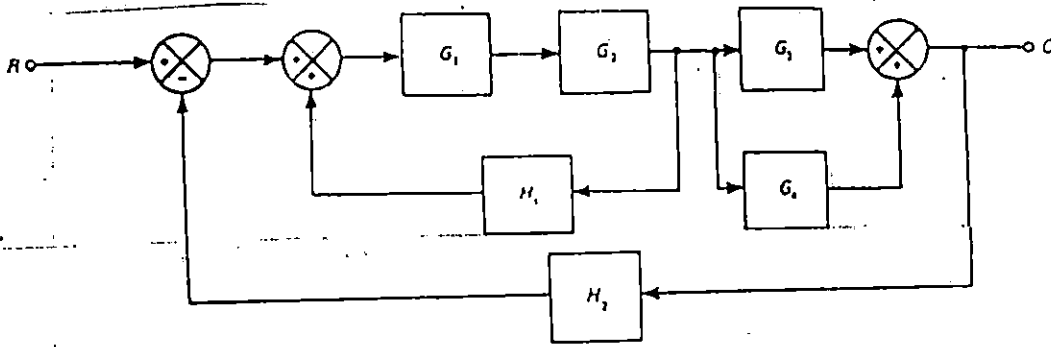
P5D, *Sistem Pengaturan*, 1984, PEDC Bandung, hal . 1-45

Shinners. Stanley.M, *Modern Control System Theory and Application*, 1978, Addison Wesley Publishing Company London, p. 2-5.

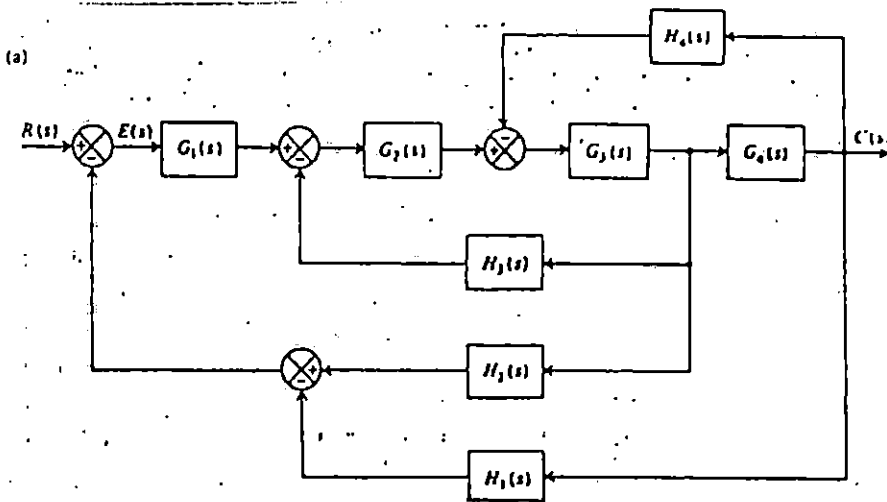
Widodo.RJ, *Sistem Pengaturan (diktat kuliah)*, 1976, ITB Bandung, hal. 28-35

Soal-Soal Latihan

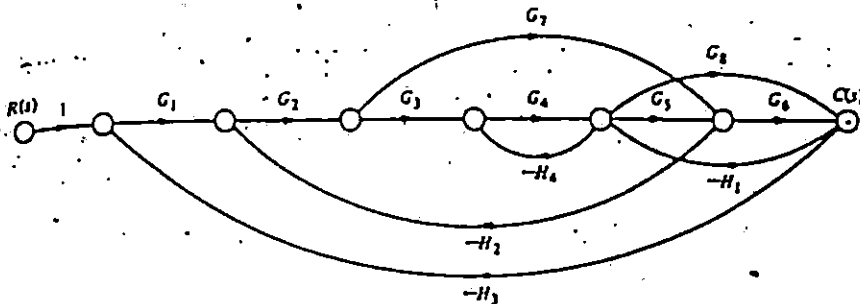
1. Sederhanakan diagram blok sistem di bawah ini dan carilah $\frac{C}{R}$ nya



2. Tentukan fungsi alih sistem pengaliran di bawah ini menggunakan teknik reduksi diagram blok dan teorema Mason



(b)



BAB V PERFORMANSI SISTEM

Dalam beberapa kasus praktis, karakteristik performansi sistem kontrol yang diinginkan dinyatakan dalam bentuk wawasan waktu. Biasanya respon sebuah sistem akan terjadi apabila padanya dikenai berbagai jenis signal input. Respon ini disebut pula dengan *transien respon*. Respon transien sistem sering menunjukkan osilasi yang teredam, sebelum mencapai keadaan lunak (*steady state*). Oleh sebab itu peredaman merupakan bagian yang penting pada sistem yang stabil.

TUJUAN

Setelah mempelajari bab ini anda dapat :

1. Mengetahui karakteristik respon transien.
2. Memahami pengaruh berbagai input terhadap output pada sebuah sistem.
3. Menyelesaikan solusi transien untuk sistem listrik.
4. Menjelaskan spesifikasi respon transien.

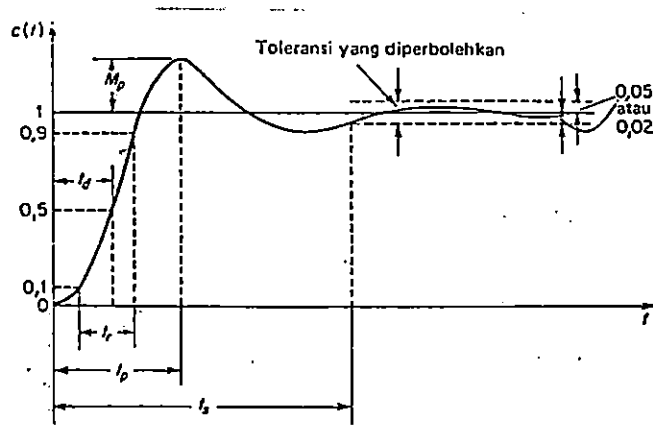
5.1 Respon Transien

Untuk menganalisis sistem pengaturan atau mempelajari sifat-sifat tanggapannya selalu dipengaruhi oleh input sistem tersebut. Beberapa jenis fungsi-fungsi yang dipergunakan sebagai input biasanya berbentuk fungsi step, fungsi sinus, unit impuls, fungsi ramp, dan fungsi parabola.

Contoh-contoh dari fungsi di atas dapat ditemukan seperti switching pada rangkaian listrik dc merupakan fungsi step. Tegangan generator merupakan fungsi sinus. Air yang mengalir ke dalam tangki dengan laju yang tetap akan menggambarkan fungsi ramp untuk penambahan tekanan pada dasar tangki. Jarak yang ditempuh mobil dengan percepatan konstan adalah fungsi parabola.

Sedangkan untuk fungsi unit impuls yang murni, tidak mungkin ada. Tetapi pada praktiknya pulsa dengan periode kecil dapat dianggap sebagai fungsi impuls apabila lebar pulsa itu jauh lebih kecil dari tetapan waktu sistem tersebut.

Fungsi unit step adalah input yang paling cocok dan bermanfaat sekali untuk mempelajari penampilan transien. Gambar 5-1 menunjukkan respons sebuah sistem terhadap input unit step, dengan parameter berikut :

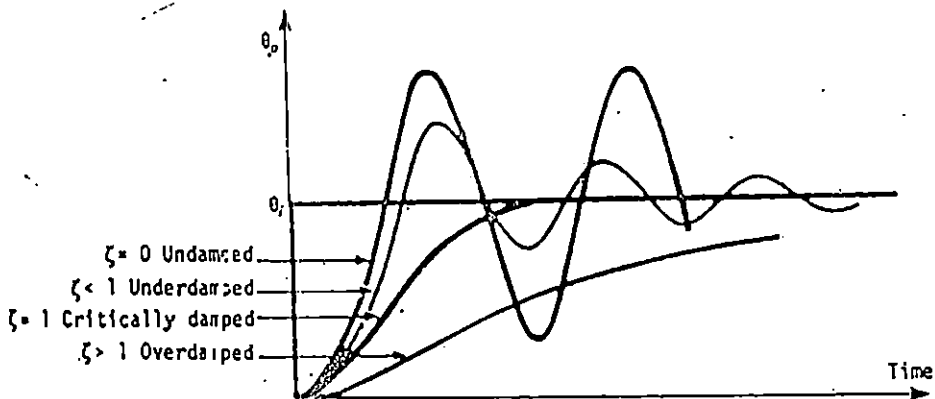


Gambar. 5-1: Kurva respon input unit langkah

1. Overshoot (lewatan maksimum= M_p) adalah perbedaan maksimum antara respons transien dan keadaan tunak (steady state) untuk fungsi input unit step. Overshoot merupakan suatu ukuran untuk menentukan kestabilan relatif sebuah sistem. Biasanya dinyatakan dalam persen $M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$
2. Waktu tunda (delay time = t_d) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
3. Waktu naik (rise time = t_r) adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90% harga akhirnya.
4. Waktu puncak (t_p) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lonjakan maksimum yang pertama kali.
5. Waktu penetapan (setting time = t_s) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menentukan di dalam daerah sekitar harga akhir yang ditetapkan (biasanya 2-5%). Waktu penetapan ini berkaitan dengan konstanta waktu (τ) terbesar dari sistem pengaturan. Respon yang tinggal pada 1% harga akhir pada kira-kira 5τ detik.
6. Konstanta waktu (τ) adalah untuk menentukan kerusakan respon dengan persamaan : $\tau = 2J/F$

5.2 Macam-macam Peredaman Sistem

Karena pengaruh besarnya redaman dan gaya gesekan pada sebuah sistem respon terhadap input unit step, akan terjadi salah satu dari keempat penampilan pada gambar berikut.



Gambar. 5-2. Berbagai respons sistem orde kedua terhadap input langkah

Anggaplah bahwa gaya total gesekan dengan redaman adalah F dan bila diperlukan sistem merespon pada redaman kritis dengan gaya F_c , maka ratio peredaman ζ (zeta) = F/F_c

$$\text{dimana : } F_c = 2\sqrt{KJ}$$

Tanpa suatu peredaman, sistem akan berosilasi pada frekuensi sudut ω_n disebut dengan frekuensi alami tak teredam :

$$\omega_n = K/J$$

ketika pada redaman kurang, sistem akan berosilasi pada frekuensi sudut ω_d sebesar:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\text{dari persamaan di atas maka : } F = 2\zeta \sqrt{KJ}$$

Substitusikan untuk dari persamaan $\sqrt{K/J}$ dari persamaan di atas Maka

$$F/J = 2\zeta\omega_n$$

Dengan membagi persamaan differensial berikut dengan J , didapat :

$$\frac{d^2\varphi_0}{dt^2} + \frac{F}{J} \frac{d\varphi_0}{dt} + \frac{K}{J} \varphi_0 = K\varphi_1$$

Substitusi kan F/J dan K/J dari persamaan di atas

$$\frac{d^2\varphi_0}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\varphi_0}{dt} + \omega_n^2 \varphi_0 = \omega_n^2 \varphi_1$$

persamaan ini disebut persamaan tanpa dimensi.

Mengacu pada gambar 1 dan persamaan 2 dapat disimpulkan sebagai berikut :

Apabila $F < F_C$, maka $\zeta < 1$.

Sistem adalah peredaman kurang, digunakan pada servo.

Apabila $F = F_C$ maka $\zeta = 1$.

Sistem peredaman kritis, dipakai pada hal-hal khusus.

Apabila $F > F_C$, maka $\zeta > 1$

Sistem teredam lebih, jarang digunakan.

Apabila $F = 0$, maka $\zeta = 0$.

Sistem tidak teredam dan tidak stabil.

Respon waktu sistem kontrol terdiri dari dua bahagian yaitu respon transien dan keadaan tunak (steady state). Respon transien ialah respon sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir. Untuk respon keadaan tunak, yaitu perilaku (karakteristik) keluaran sistem jika t mendekati tak berhingga.

5.3 Pembahasan Transien

Persamaan diferensial pada di atas menjelaskan perilaku sistem orde ke dua dalam bentuk parameter transiennya. Persamaan ini akan kita jadikan pembahasan transien dengan berbagai input.

1. Respon terhadap input unit step

Untuk ratio persamaan kira-kira 0,7 (kebanyakan untuk sistem servo) maka responnya terhadap input unit step diperlihatkan pada gambar di bawah. Apabila pada kondisi steady state, nampak bahwa output sama dengan input, kesalahannya sama dengan nol.

Dengan demikian untuk satu input unit step, $\varphi_{ss} = 0$, waktu persamaan di atas dan kaitannya dengan ζ dan ω_n akan menjadi :

$$\varphi_o = \varphi_i \left[- \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left\{ \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \phi \right\} \right]$$

$$\text{dimana } \text{tg } \phi = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}$$

Untuk harga ζ yang berbeda maka respon dilukiskan seperti pada gambar 5.1.

Apabila harga ζ dinaikkan dan dihubungkan dengan persamaan di atas terlihat bahwa

a. respon akan mengalami kurang osilasi

- b. besaran lonjakan berkurang
- c. waktu respon naik dan sistem tidak menentu.

Waktu respon dapat dikurangi dengan menaikkan penguatan amplifier. Namun ω_n akan naik dengan nilai ζ berkurang dan menyebabkan sistem tidak stabil. Ratio peredaman antara 0.6 dan 0.7 akan memberikan respon tercepat dengan lonjakan terkecil sehingga dapat dicatat bahwa sebuah sistem mempunyai kecepatan respon yang tinggi apabila konstanta waktunya kecil.

Waktu yang diperlukan untuk melakukan lonjakan dapat dihitung dengan persamaan :

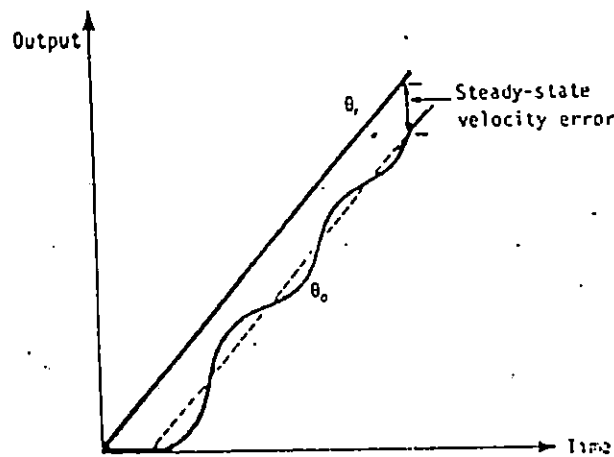
$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} - \frac{\pi}{\omega_d}$$

dan persentase lonjakan dinyatakan dengan :

$$1000e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$$

5.4 Respon terhadap Input Kecepatan

Respon terhadap input kecepatan sistem peredaman kurang digambarkan pada gambar 5.3.



Gambar.5.3. Respon sistem teredam terhadap input kecepatan.

Dalam gambar nampak bahwa : setelah osilasi transien hilang, kecepatan sudut output sama dengan kecepatan sudut input. Namun sumber output tertinggal sedikit dari posisi sumbu input, dikenal sebagai kesalahan kecepatan atau ketertinggalan kecepatan. Bagaimanapun juga, kesalahan selalu ada, seperti pada motor dapat

menghasilkan torsi jika ia mendapatkan input dari amplifier (penguat). Untuk input $\varphi_i = \omega_i t$, penyelesaian persamaan differensial menjadi :

$$\varphi_0 = \omega_i \left[t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\frac{\zeta \omega_n t}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}} \times \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \right] + \varphi$$

$$\text{dim ana : } \phi = 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$

pada kondisi steady state, persamaan output menjadi :

$$\varphi_{o(\omega)} = \omega_i t - \frac{2\zeta \omega_i}{\omega_n}$$

oleh sebab itu, kesalahan akan menjadi :

$$\varphi_u = \varphi_i - \varphi_0 = \omega_i t - \omega_i t + \frac{2\zeta \omega_i}{\omega_n} = \frac{2\zeta \omega_i}{\omega_n}$$

Pada sistem kontrol posisi seperti mesin perkakas atau sistem radar yang output harus mengikuti posisi input dengan presisi, kesalahan kecepatan sangat dihindarkan. Besarnya kesalahan kecepatan tersebut dapat dikurangi dengan menaikkan penguatan pada amplifier. Tetapi input unit langkah akan menyebabkan sistem lebih berosilasi.

5.4.1. Respon terhadap input sinusoida

Untuk input sinusoida bentuk $\varphi_i = A \sin(\omega t)$ dan output steady state akan menjadi

$$\varphi_{o(ss)} = B \sin(\omega t + \phi)$$

di sini tampak bahwa frekuensi sudut dari output sama dengan input, tetapi terjadi perbedaan fase dimana output tertinggal dari input sebesar ϕ^0 . Bagi input sinusoida harga maksimum φ_i dengan frekuensi sudut ω , maka penyelesaian persamaan steady state dirumuskan sebagai berikut.

$$\varphi_{o(ss)} = \frac{\varphi_i \omega_n^2 (\omega_i + \phi)}{\sqrt{[\varphi_i \omega_n^2 - \omega^2]^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}}$$

dim ana :

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{2\zeta \omega_n \omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

Contoh : 5.1.

Posisi sudut sebuah antena radar dikontrol dengan sistem pengaturan lup terbuka mengikuti roda masukan (input wheel). Input ini diinginkan menurut osilasi sinusoida

sebesar $\pm 36^\circ$ dengan frekuensi $\omega = 2$ rad/detik. Antena bergerak secara peredaman kritis yang mempunyai momen inersia $= 200 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ dan torsi gesekan $1600 \text{ N}\cdot\text{m}$ per rad/det. Hitunglah ayunan antena dan waktu tinggal antara antena dan roda input.

Pemecahan :

$$\omega_n = \frac{T}{2\zeta J} = \frac{1600}{2 \times 1 \times 200} = 4 \text{ rad/detik}$$

Besar ayunan antena adalah

$$\begin{aligned} \theta_{\alpha, \omega} &= \frac{\theta_n \omega_n}{\sqrt{[(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2]}} \\ &= \frac{36 \times 4^2}{\sqrt{[(4^2 - 2^2)^2 + (2 \times 1 \times 4 \times 2)^2]} \\ &= \frac{576}{\sqrt{400}} = \pm 28,8^\circ \end{aligned}$$

Ketertinggalan fase

$$\tan \varphi = \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2} = \frac{2 \times 1 \times 4 \times 2}{4^2 - 2^2} = \frac{4}{3}$$

Maka $\varphi = 53,2^\circ$

Apabila $\omega = 2$ rad/det. Maka $f = 2/2\pi$ Hz dan priode satu osilasi adalah

$$T = \frac{1}{f} = \pi \text{ detik}$$

Jadi, ketertinggalan fase sebesar $53,2^\circ$ dan hubungannya dengan waktu adalah

$$t = \frac{T \times \varphi}{360} = \frac{\pi \times 53,2}{360} = 0,465 \text{ detik}$$

5.5 Peredaman

Agar sistem dapat merespon dengan cepat, osilasi haruslah segera mungkin dihilangkan. Oleh sebab itu diperlukan peredaman.

Redaman yang kuat (viscous damping) menimbulkan gaya gesekan yang sebanding dengan gerakan lisik yang relatif. Bagaimanapun juga peredaman ini menimbulkan kerugian panas dan daya, kecuali pengaturan posisi yang kecil oleh servo. Ini jarang dipakai.

a. Feedback kecepatan

Cara lain peredaman adalah penggunaan feedback kecepatan, yakni suatu tegangan yang sebanding dengan kecepatan sudut output difeedbackkan dan dikurangi dari tegangan kesalahan. Oleh sebab itu kerugian daya akibat gesekan dapat dikurangi dan torsi motor akan mempercepat terjadinya respon. Sistem kontrol yang menggunakan cara peredaman kuat dan feedback kecepatan tergantung pada diagram berikut ini. Persamaan diferensial tersebut adalah sebagai berikut.

$$J \cdot \frac{d^2 \phi_o}{dt^2} + F \cdot \frac{d \phi_o}{dt} = k_A k_1 \varepsilon$$

tetapi $\varepsilon = K_1 (\phi_i - \phi_o) - K_2 \frac{d \phi}{dt}$

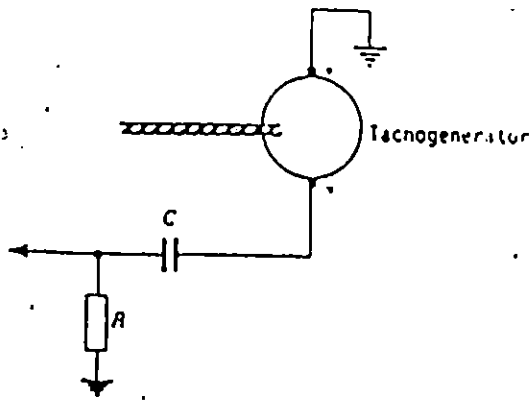
maka :

$$J \cdot \frac{d^2 \phi_o}{dt^2} + F \cdot \frac{d \phi_o}{dt} = k_A k_1 \left[K_1 (\phi_i - \phi_o) - K_2 \frac{d \phi}{dt} \right]$$

$$J \cdot \frac{d^2 \phi_o}{dt^2} + (F \cdot k_A k_1 K_2) \frac{d \phi_o}{dt} = k_A k_1 K_1 \phi_o = k_A k_1 K_1 \phi_i$$

Walaupun feedback kecepatan mengatasi masalah kerugian panas karena gesekan, namun ia tidak mengurangi kesalahan kecepatan. Ini disebabkan karena pada kondisi steady state, tachogenerator masih memerlukan tegangan lawan yang konstan.

Sebuah kapasitor yang disricikan dengan signal feedback akan melewatkan feedback selama periode transien, tetapi menghambat tegangan konstan pada kondisi steady state. Pada prakteknya, jaringan C-R sering digunakan yang bekerja sebagai differensiator dan jika feedback akan efektif hanya selama periode transien, bentuk peredaman ini disebut feedback kecepatan transien, seperti pada gambar berikut.



Gambar. 5-5. Feedback kecepatan selama transien.

b. Nilai Kesalahan

Cara yang paling umum untuk mendapatkan respon yang diinginkan yaitu menggunakan peredaman nilai kesalahan. Pada beberapa sistem, signal kesalahan dilewatkan melalui jaringan yang memberikan output sebanding dengan kesalahan ditambah nilai perubahannya.

Perhatikan gambar di bawah, dan anggaplah R_2 lebih kecil dari R_1 . $R_1 R_2$ melewatkan signal yang sebanding dengan tegangan kesalahan, sementara $C-R_2$ bertindak sebagai differensiator dan memberikan signal yang sebanding dengan nilai perubahan tegangan kesalahan. Pada kondisi steady state, kapasitor bertindak sebagai rangkaian terbuka dan

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \varepsilon$$

Selama R_2 jauh lebih kecil dari R_1 , tegangan output akan berselisih sedikit dari tegangan kesalahan. Oleh sebab itu, tegangan melalui R_1 dan C akan mendekati sama dengan tegangan input.

$$V_c = VR_1 = \varepsilon - V_o = \varepsilon$$

$$\text{Maka : } i_c = C \frac{d\varepsilon}{dt} \text{ dan } i_1 = \frac{\varepsilon}{R_1}$$

tetapi :

$$V_o = (i_1 + i_c) R_2 = \left(\frac{\varepsilon}{R_1} + C \frac{d\varepsilon}{dt} \right) R_2$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \varepsilon + R_2 C \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Rangkaian pada gambar 5.5. memberikan output yang proporsional tambah turunan dari tegangan kesalahan input. Tegangan ini kemudian dimasukkan ke penguat untuk memperkuat signal ke motor.

Anggaplah sebagai sistem servo menggunakan peredaman nilai kesalahan. Ketika input step diaplikasikan, beban berpindah menuju posisi yang diinginkan. Kesalahan akan berkurang, nilai kesalahan menjadi negatif. Signal yang dipakai pada amplifier dan menimbulkan efek peredaman pada torsi motor. Hal ini secara

efektif menaikkan ratio persamaan sistem dan menurunkan lonjakan. Peredaman nilai kesalahan tidak mempengaruhi kesalahan tunak karena saat kesalahannya konstan, nilai perubahannya adalah nol. Rangkaian ini dinamai "Rangkaian Phase terdahulu."

c. Kendali Integral

Salah satu cara yang paling efektif menghilangkan kesalahan tunak yaitu menggunakan kendali interval, dimana input amplifier merupakan penjumlahan dua besaran dari : 1) tegangan kesalahan, dan 2) integral waktu tegangan kesalahan. Selama ada kesalahan, amplifier mempunyai input dan outputnya akan terus naik (pengaruh integral), memberikan harga pada motor sampai besaran input dan outputnya sama besar.

Anggaplah R_2 kecil dari R_1 selaman $\varepsilon = iR + V_0$

Maka :

$$i = \frac{\varepsilon - V_0}{R_1}$$

Selama $R_2 < R_1$, tegangan output akan selisih sedikit dari input, maka : $I = \frac{\varepsilon}{R_1}$

dan :

$$V_0 = VR_2 + V_c = iR_2 + 1/C \int i dt$$

Substitusikan untuk i :

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \varepsilon + \frac{R_2}{R_1} \int \varepsilon dt$$

Dapat dilihat bahwa tegangan output adalah penjumlahan dari 2 buah besaran : perbandingan terhadap kesalahan dan perbandingan terhadap integral kesalahan, rangkaian ini disebut Rangkaian Phase Tertinggal.

Kesimpulan

Performansi sistem akan terasa apabila adanya pengaruh sinyal input. Setelah merespon terdapat dua kondisi yaitu *masa transien* dan *masa steady state* (kondaan tunak). Pada kondisi tunak input dan output berputar dengan kecepatan tetap. Akibat adanya pengaruh peredaman akan terjadi salah satu dari keempat kondisi redaman yang

menunjukkan performansi sistem antara lain : peredaman lebih, peredaman kritis, teredam, dan tidak teredam.

Performansi sistem ini secara kualitatif berhubungan dengan :

1. Seberapa cepat sistem berpindah mengikuti input
2. Bagaimana terjadinya osilasi
3. Seberapa lama ia mencapai nilai akhir.

Bahan Bacaan

Ogata Katsuhiko dan Edi Laksuno, *Teknik Kontrol Otomatik (Jilid 1)*, 1985, Penerbit Erlangga Jakarta, hal. 221-257.

Pakpahan, S *Kontrol Otomatik (Teori dan Penerapan)*, 1988, Penerbit Erlangga Jakarta, hal. 79-91

Yousefzadeh, *Basic Control Engineering*, 1979, Longman Scientific and Technical London, p.77-105

Soal-Soal Latihan

1. Terangkan istilah yang biasa dipakai pada sistem pengaturan berikut ini
 - a. penguatan sistem lup terbuka
 - b. Frekuensi tak redam
 - c. Kesalahan kecepatan

2.
 - a. Dengan bantuan grafik respon transien, jelaskan arti istilah puncak lonjakan dan waktu penetapan (ts).
 - b. Sebuah pengaturan posisi dengan faktor redam 0,5 dan frekuensi tak redam alami adalah 6 rad/detik. Apabila diberi input unit step tentukanlah
 - 1) Output dari respon dalam fungsi waktu
 - 2) Persentase nilai puncak lonjakan
 - 3) Waktu penetapan (ts).

BAB VI KESTABILAN SISTEM

Sebuah sistem dikatakan stabil apabila terjadi suatu perubahan pada input, outputnya menetap pada suatu keadaan yang dinamakan keadaan mantap. Ada 2 jenis ketidakstabilan jika outputnya selalu naik turun sampai mencapai kejenuhan, sistem dikatakan tidak stabil. Dengan kata lain, jika responnya terhadap suatu masukan menghasilkan osilasi yang keras pada suatu amplitudo atau harga tertentu. Bila osilasi tadi semakin kecil dan akhirnya hilang dengan bertambahnya waktu, maka sistem ditentukan sebagai sistem yang mutlak stabil. Tetapi apabila osilasi tetap pada suatu harga tertentu dan outputnya mempunyai amplitudo yang konstan, maka sistem mempunyai kestabilan yang terbatas.

Yang paling penting dalam sistem pengaturan yaitu outputnya haruslah selalu dibawah pengendalian inputnya. Apabila output suatu sistem dikat untuk setiap input yang mengikat maka sistem dikatakan stabil.

Bab ini akan menjelaskan beberapa teknik menentukan stabilitas sistem yaitu dengan metode persamaan karakteristik dan kriteria stabilitas Routh.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini, anda dapat :

1. Menentukan persamaan karakteristik sistem dengan persamaan differensial.
2. Menentukan stabilitas sistem dengan penetaan pole (kutub) dan zero (nol) pada bidang s.
3. Menentukan stabilitas sistem dengan kriteria Routh.

6.1 Persamaan Karakteristik

Fungsi alih sebuah sistem umpan balik seperti telah dibuktikan pada bab sebelumnya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Sehingga :

$$C(s) = \frac{1}{1 + G(s) H(s)} C(s) R(s)$$

persamaan ini menunjukkan bahwa output (respon sistem) merupakan perkalian dari fungsi sistem dengan fungsi masukan atau eksitasi. Dengan demikian eksitasi akan mempengaruhi terhadap respons steady state.

Untuk sistem yang akan digeneralisasi dapat ditentukan oleh fungsi eksitasi persamaan di atas dengan harga nol.

$$1 + G(s) H(s) = 0$$

Persamaan ini disebut persamaan karakteristik dan dengan persamaan ini dapat pula ditentukan apakah suatu sistem akan stabil atau tidak.

Persamaan karakteristik ini dapat ditulis dalam bentuk persamaan differensial order .

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = a_0 x$$

dimana y adalah besaran input dan x adalah besaran output. D merupakan operator differensial, sehingga :

$$D = \frac{d}{dt} \quad \text{dan} \quad D^n = \frac{d^n}{dt^n}$$

kemudian persamaan di atas dapat ditulis :

$$D^n y + a_{n-1} D^{n-1} y + \dots + a_1 D y + a_0 y = a_0 x$$

$$(D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) y = a_0 x$$

maka fungsi alih sistem menjadi :

$$\frac{y}{x} = \frac{a_0}{D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0}$$

dan

$$D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0 = 0$$

adalah pembanding dan fungsi alih sistem tersebut disebut Persamaan Karakteristik dan D dapat diganti dengan S.

untuk memeriksa sebuah sistem apakah stabil atau tidak stabil dari persamaan karakteristik ini, kita perlu mencari akar-akar dari persamaan tersebut. Dengan menggambarkan akar-akar diri di bidang S yang terdiri dari sumbu nyata dan khayal.

Apabila semua bahagian nyata dari akar-akar tersebut negatif maka sistem tersebut dinyatakan stabil dan tidak boleh ada yang positif.

Contoh 6.1. Sistem pengaturan orde dua yang berkenaan dengan ratio peredaman dan frekuensi alami tak teredam, mempunyai persamaan differensial sebagai berikut.

$$\frac{d^2\phi_0}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\phi_0}{dt} + \omega_n^2 \phi_0 = \omega_n^2 \phi_1$$

1. Dari persamaan ini, buatlah fungsi alih sistem dalam bilangan S.
2. Tuliskan persamaan karakteristiknya
3. Tentukan pole (kutub) fungsi alih itu.

Jawab :

Dari persamaan di atas dapat diambil menjadi

1. Persamaan differensial.

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2) \phi_0 = \omega_n^2 \phi_1$$

atau :

$$\frac{\phi_0}{\phi_1} = \frac{\omega_n^2}{D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2}$$

2. dipindahkan ke dalam bilangan S, maka :

$$\frac{\phi_0}{\phi_1} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2}$$

3. akar-akar dari pole persamaan ini didapat :

$$S = \zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{(1-\zeta^2)}$$

Nampaknya ada dua pole :

$$S_1 = -a + j\omega d \quad \text{dan} \quad S_2 = -a - j\omega d$$

Dimana $\omega d = \omega_n \sqrt{(1-\zeta^2)}$ adalah frekuensi alami teredam dan L

$1/a = 1/\zeta\omega_n = \tau$ adalah karakteristik waktu sistem.

Contoh 6.2. fungsi alih sebuah sistem kontrol adalah :

$$G(s) = \frac{211}{S(0,01S+1)(0,02S+1)} \quad \text{dan } H(s) = 1$$

Tentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak dengan metode persamaan karakteristik.

Jawab :

Persamaan karakteristik sistem ini adalah :

$$1 + G(s) + H(s) = 0$$

$$1 + \frac{211}{S(0,01S+1)(0,02S+1)} = 0$$

$$S(0,01S+1)(0,02S+1) + 211 = 0$$

$$0,0002 S^3 + 0,03S^2 + S + 211 = 0$$

$$S^3 + 150S^2 + S + 211 = 0$$

Jika persamaan ini diuraikan akan menghasilkan :

$$(S + 160)(S - 5 - 81j)(S - 5 + 81j) = 0$$

sehingga :

$$S_1 = -160 \quad ; \quad S_2 = 5 + 81j \quad ; \quad S_3 = 5 - 81j$$

Dapat dilihat bahwa akar-akar dari persamaan karakteristik ini mempunyai bagian nyata yang positif, maka sistem tidak stabil.

Defenisi

Suatu sistem dikatakan stabil apabila setiap input yang mengikat, maka output akan tetap terikat.

Input yang mengikat ialah suatu besaran yang selalu kurang daripada suatu nilai batas.

Dengan kata lain sebuah sistem menjadi stabil, apabila tidak satupun dari pleh (kutub) dari fungsi alih lup tertutup berada pada bahagian kanan bidang S.

6.2 Kriteria Stabilitas Routh

Salah satu karakteristik yang sering ditemui dalam penentuan kestabilan sistem dengan metode persamaan karakteristik adalah mendapatkan akar-akar persamaan dengan orde banyak. Cara yang lebih mudah dapat digunakan dalam wawasan S (Laplace). Sebuah sistem dengan persamaan karakteristik dalam bentuk

$$a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0 = 0$$

akan stabil apabila :

1. Semua koefesien S dan n ke 0 dinyatakan dan positif.
2. Semua nilai pada kolom pertama kesatuan susunan dari persamaan karakteristik mempunyai tanda yang sama.

Jika ada perubahan tanda menunjukkan bahwa pole (kutub) berada pada sebahagian kanan bidang S .

Susunannya dibentuk sebagai berikut.

a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	a_{n-6}
a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	
b_1	b_2	b_3	
c_1	c_2		
d_1	d_2		
e_1			
...			
...			

dimana a_n, a_{n-1} dan seterusnya adalah koefesien dari persamaan karakteristik dan

$$b_1 = \frac{a_{n-1} \times a_{n-2} - a_n \times a_{n-3}}{a_{n-1}}$$

$$b_2 = \frac{a_{n-1} \times a_{n-4} - a_n \times a_{n-5}}{a_{n-1}}$$

$$c_1 = \frac{b_1 \times a_{n-3} - a_{n-1} \times b_3}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{b_1 \times a_{n-1} - a_{n-1} \times b_3}{b_1}$$

$$d_1 = \frac{c_1 \times b_2 - b_1 \times c_2}{c_1}$$

$$e_1 = \frac{d_1 \times c_2 - c_1 \times d_2}{d_1}$$

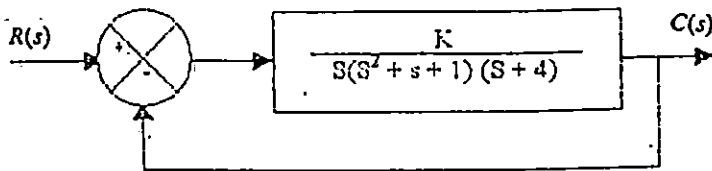
Contoh 6.3. Periksalah sistem orde 4 dengan persamaan karakteristik berikut. Apakah stabil atau tidak dengan metode Routh.

$$S^4 + 8S^3 + 18S^2 + 16S + 5 = 0$$

S^4	1	18	5
S^3	8	16	
S^2	$\frac{8 \times 8 - 1 \times 16}{8} = 16$	$\frac{8 \times 8 - 1 \times 0}{8} = 0$	
S^1	$\frac{16 \times 16 - 8 \times 5}{8} = 13,5$	0	
S^0	5	0	

Tanda pada kolom pertama mempunyai tanda yang sama jadi dapat disimpulkan bahwa sistem ini adalah stabil.

Contoh 6.4. Perhatikan blok diagram sistem pengaturan lup tertutup di bawah ini.



Tentukan batas nilai K agar sistem ini dalam keadaan stabil.

Jawab :

Fungsi alih lup tertutup sistem adalah :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{S(S^2 + S + 1)(S + 4) + K}$$

Maka persamaan karakteristiknya adalah :

$$S(S^2 + S + 1)(S + 4) + K = 0$$

$$S^4 + 5S^3 + 5S^2 + 4S + K = 0$$

Susunan bentuk Routh dari persamaan itu :

S^4	1	5	K
S^3	5	4	
S^2	$2/5$		
S^1	$(84 - 5K)/21/5$		
S^0	K		

Sistem akan stabil, kalau kolom pertama dari susunan Routh mempunyai nilai positif

Oleh sebab itu sistem yang stabil haruslah :

$$K > 0$$

$$(84/25 - 5K) > 0$$

Ketika $K = 84/25$, akan adalah sebuah zero (nol) pada pemasukan pertama lajur keempat pada susunan Routh seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, hubungan ini terhadap sepasang akar yang simetris seperti terlihat di bawah ini betul-betul imajiner (khiyal). Oleh sebab itu $K = 84/25$ menyebabkan timbulnya osilasi sendiri pada sistem lup tertutup.

Untuk $K = 84/25$, persamaan pangkat banyak tambahan yang diberikan oleh koefisien row ketiga adalah :

$$(21/5)S^2 + 84/25 = 0$$

$$S = \pm j\sqrt{4/5} = \pm j\omega_0$$

Osilasi sendiri terjadi pada $K = 84/25$ adalah $\sqrt{4/5}$ rad/dcr.

Kesimpulan

Kestabilan merupakan masalah pokok dalam sistem pengaturan lup tertutup. Respon suatu sistem yang stabil ditandai dengan adanya transien yang menurun menuju nol terhadap pertambahan waktu. Untuk menentukan kestabilan itu dilakukan dengan berbagai metode antara lain *persamaan karakteristik* yaitu dengan cara memetakan akar-akarnya di bidang s. Kelemahan metode ini adalah mencari akar-akar dari persamaan berpangkat banyak. Metode yang lebih mudah dan sederhana dipakai kriteria kestabilan menurut Routh.

Bahan Bacaan

Nagrath.LJ and Gopal, *Control System Engineering*, 1984, Wiley Estern Ltd, New Delhi ,p. 181-200.

Pakpahan.S, *Kontrol Otomatik(Teori dan Penerapan)*, 1988, Penerbit Erlangga Jakarta hial. 115-127

Shinners.Stanley M.,*Modern Control System Theory and Application*,1978, Addison Wesley Pubhllising Company, London, p.198-212.

Yousefzadeh, *Basic Control Engineering*,1979, Longman Scientific and Technical London, p.106-115.

Soal-Soal Latihan

1. Tentukan akar-akar dari persamaan kuadrat sistem yang mempunyai fungsi alih di bawah ini . Plot akar-akar itu pada bidang s dan nyatakan kestabilan sistem tersebut.

a. $G(s)H(s) = \frac{1}{(s+2)(s+4)}$

b. $G(s)H(s) = \frac{5(s+3)}{s(s+3)(s+8)}$

c. $G(s)H(s) = \frac{9}{s^3(s+2)}$

2. Fungsi alih sistem kendali feed back lup terbuka adalah

$$G(s) = \frac{K(s+13)}{s(s+3)(s+7)}$$

- a. Dengan menggunakan kriteria Routh, hitunglah nilai K saat sistem dalam kondisi stabil.
- b. Periksa apakah apabila $K = 1$ semua akar-akar persamaan kuadrat mempunyai rasio peredaman lebih besar dari 0,5.

BAB VII TEMPAT KEDUDUKAN AKAR-AKAR

Metode Root Locus atau tempat kedudukan akar-akar adalah suatu teknik grafik, untuk menentukan akar-akar persamaan karakteristik sebuah sistem sebagai fungsi dari penguatan yang tetap.

Metode ini didasarkan atas hubungan yang berada diantara pole dari fungsi alih lup tertutup dan pole dari nol (zero) dan fungsi alih lup tertutup.

Metode ini mempunyai beberapa keuntungan. Suatu pemecahan masa steady state dan transien yang lengkap, akurat dan mendetail dapat ditentukan dan pole-pole lup tertutup dapat dicari langsung dan tempat kedudukan akar itu. Dari sketsa root locus dapat divisualisasikan pengaruh berbagai parameter sistem pada lokasi akar-akar itu dan memberikan suatu ukuran yang sedang dialami.

Bab ini akan mendiskusikan konsep-konsep teknik root locus, prosedur menggambarkan root locus dan analisis sistem feedback menggunakan teknik root locus.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini, anda dapat :

1. Menentukan kestabilan sistem dengan sketsa teknik root locus
2. Prosedur penggambaran root locus.

7.1 Metode Root Locus untuk Sistem Negatif Feedback

Dari persamaan fungsi alih lup tertutup sebuah sistem feedback dinyatakan dengan :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Untuk mendapatkan akar-akar pole dari fungsi alih ini maka :
 $1 + G(s)H(s) = 0$ dan $G(s)H(s) = -1 = 1 < (2n + 1) \pi$

Dimana $n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$ (sesuai dengan keadaan pole lup tertutup). Jadi di sini terdapat 2 persyaratan :

1. syarat besaran $|F(s)| = 1$, dan
2. syarat sudut $\angle F(s) = 180^\circ \pm k \cdot 360^\circ$

Pada umumnya $G(s)H(s)$ dituliskan dalam bentuk polinomial :

$$G(s)H(s) = \frac{K(S+S_A)(S+S_C)}{S(S+S_B)(S+S_D)}$$

Dimana K adalah perkalian semua penguatan lup (negatif dan positif). Suku-suku pembilang dalam kurung menunjukkan harga-harga nol. Lup terbuka (open loop zeroes) yaitu $-S_A, -S_C$ dan seterusnya, sedangkan yang di dalam penyebut menunjukkan harga-harga kutub lup terbuka (open loop poles) yaitu $-S_B, -S_D$. dengan mengubah harga K dari 0 menuju ∞ , lokasi harga-harga kutub akan membentuk suatu tempat kedudukan akar-akar dalam bidang S . metode ini disebut metode tempat kedudukan akar-akar (root locus atau TK).

7.2 Aturan Menggambarkan TK

Berikut ini dibuatkan beberapa aturan menggambarkan tempat kedudukan akar-akar.

- Aturan 1, setiap TKA (Tempat Kedudukan akar-akar) mulai pada pole (kutub) lup terbuka ketika $K=0$ dan berhenti pada sebuah titik nol (zero). Lup terbuka atau mendekati tak berhingga sepanjang asimptot ketika $K=\infty$.
- Aturan 2, Terdapat cabang-cabang TK sebanyak pole lup terbuka
- Aturan 3, TKA selalu simetris terhadap sumbu nyata.
- Aturan 4, Apabila ada m kutub lup terbuka dan n zero (nol) lup terbuka dan $n > m$, maka $m - n$ cabang-cabang TK mendekati tak berhingga
- Aturan 5, Setiap bagian sumbu nyata yang membentang ke kiri dari kutub (pole) dan nol (zero) bernomor ganjil akan membentuk TK
- Aturan 6, Asimptot memotong sumbu nyata pada suatu titik X pada :

$$x = (\sum (\text{pole lup terbuka}) - \sum (\text{zero lup terbuka})) / (m-n)$$

Aturan 7, Sudut yang dibuat oleh asimptot dengan sumbu nyata didapat sebesar

$$\alpha = \pm \frac{k \times 180}{m - n}$$

Aturan 8, Nilai K pada titik yang menyimpang dari TK dengan sumbu j dapat ditentukan dengan kriteria Routh atau dengan aturan 9

Aturan 9, Titik simpang (dari TK dengan sumbu j) dapat dicari dengan cara seperti berikut :

- 1) ganti s dengan j ω pada persamaan karakteristik
- 2) samakan bahagian imajiner dengan nol
- 3) carilah ω
- 4) carilah k

Aturan 10, Selalu terdapat satu titik pecah antara dua buah pole yang berdekatan pada sumbu nyata yang dihubungkan oleh sebuah cabang TK.

Aturan 11, TK meninggalkan sumbu nyata (disebut titik pecah) dimana K maksimum, oleh sebab itu, dari persamaan karakteristik $dK/ds = 0$

Aturan 12, Sudut berangkat, didefinisikan sebagai sudut pada saat TK meninggalkan pole kompleks yang ditentukan dengan hubungan dari:

$$\Sigma \varphi_z - \Sigma \varphi_p = \pm 180^\circ$$

dimana $\Sigma \varphi_p$ adalah jumlah semua sudut yang dibentuk oleh pole dan $\Sigma \varphi_z$ jumlah semua sudut yang dibentuk oleh zero.

Contoh :

Gambarkan diagram TK akar-akar sistem yang mempunyai fungsi alih :

$$G(s) = \frac{K}{s(s^2 + 2s + 2)}$$

Jawab :

Dari fungsi alih ditentukan persamaan karakteristiknya dengan nilai K = 0, maka didapat :

$$s(s^2 + 2s + 2) = 0, \text{ atau}$$

$s(s+1+j)(s+1-j) = 0$, maka :

$s_1 = 0$; $s_2 = -1 - j$ dan $s_3 = -1 + j$

Terdapat hanya 3 buah pole dan tidak ada zero.

(aturan 2)

Asimptot memotong sumbu nyata pada titik X.

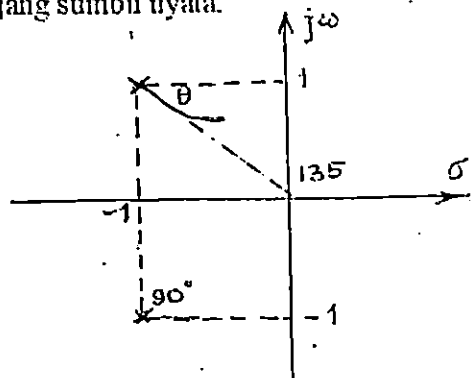
$$X = \frac{\sum p - \sum z}{m - n} = \frac{[(0) + (-1 + j) + (-1 - j)] - [(0)]}{3 - 0} = -2/3$$

(aturan 6)

Asimptot akan membuat sudut sebesar α . (Aturan 7)

$$\alpha = \pm \frac{k \times 180}{m - n} = \frac{1 \times 180}{3 - 0} = \pm 60^\circ \text{ untuk } k = 1$$

$k = 3$, $\alpha = 180^\circ$ yang menunjukkan bahwa sebuah cabang TF. mendekati tak terhingga sepanjang sumbu nyata.



Gambar 7.1. Penentuan sudut berangkat

Untuk menentukan sudut dimana TF. meninggalkan kutub (pole kompleks) maka aturan 12 digunakan. Dengan menggunakan rumus dari gambar 7.1 didapat

$$\sum \varphi_z - \sum \varphi_p = \pm 180^\circ$$

$$[(00) - [(BS)] + (90) + [(\varphi)] = \pm 180^\circ$$

$$\text{maka } \varphi = \pm 45^\circ$$

Persamaan karakteristik adalah :

$$s(s^2 + 2s + 2) + K = 0$$

$$\text{Atau } s^3 + 2s^2 + 2s + K = 0$$

$$s = j\omega \quad (\text{aturan 9})$$

$$(j\omega)^3 + 2(j\omega)^2 + 2(j\omega) + K = 0$$

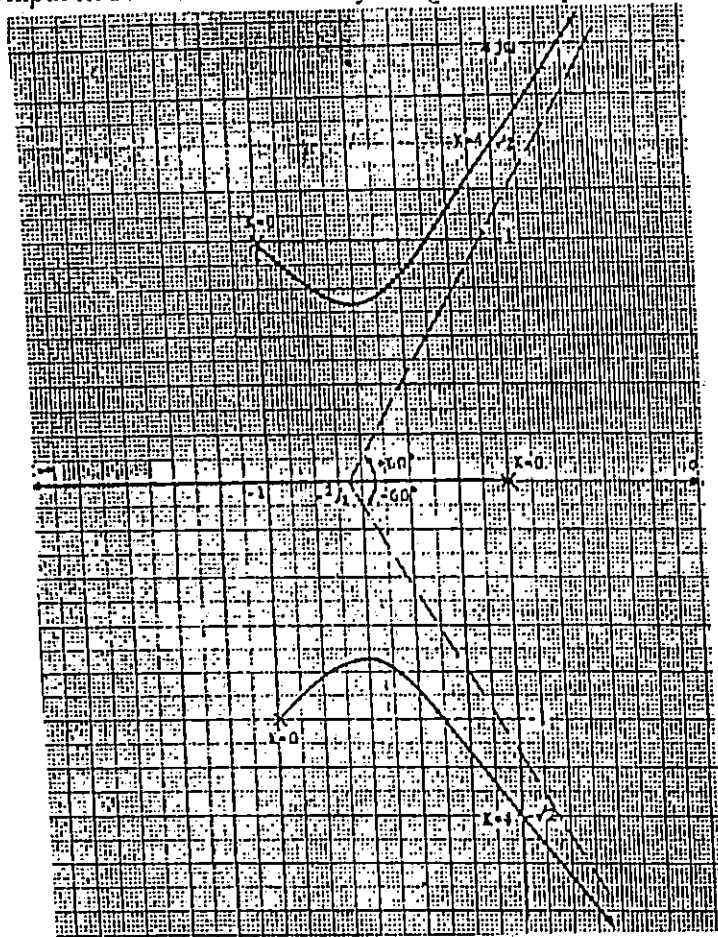
$$-j\omega^3 - 2\omega^2 + j2\omega + K = 0$$

$$(K - 2\omega^2) + j(2\omega - \omega^3) = 0$$

Samakan bahagian imajiner (khayal) dengan 0, maka $2\omega - \omega^3 = 0$, $\omega = \pm\sqrt{2}$

dan $K - 2\omega^2 = 0$, maka $K = 2\omega^2 = 2 \times 2 = 4$

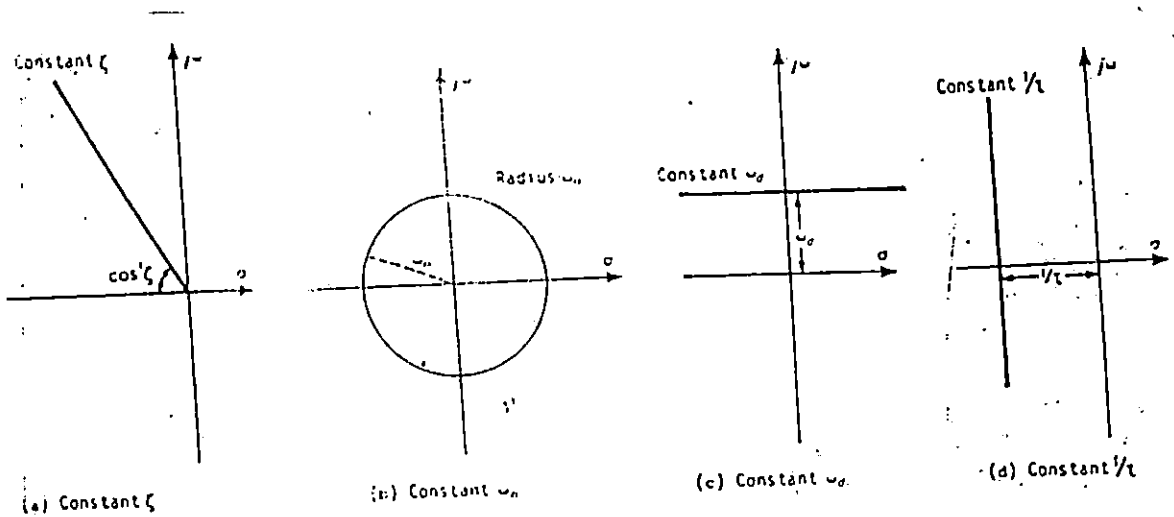
TK akan memotong sumbu j , pada $\omega = \pm\sqrt{2}$ dan harga K pada titik tersebut adalah 4. Tempat kedudukan akar-akarnya fergambar seperti berikut.



Gambar 7.2. TKA dari $\frac{K}{s(s^2 + 2s + 2)}$

7.3 Parameter Sistem pada Sistem Penyaluran

gambar 7.3 memperlihatkan empat buah garis yang menyatakan nilai konstan dari ζ , ω_n , ω_n , dan $1/\tau$ pada bidang s . Garis-garis ini dapat dipedomani sebagai parameter sistem apabila dipakai tempat kedudukan akar-akar.



Gambar 7.3. Parameter sistem

Nilai K pada Suatu Titik Tertentu pada TK

- I. Jika titik K terletak pada sumbu nyata, secara sederhana dengan mensubstitusikan s pada persamaan karakteristik, maka nilai K absolut dapat dihitung :

Contoh :

Tentukan nilai K pada $s = -9$ untuk sistem lup terbuka dengan fungsi alih.

$$KG(s)H(s) = \frac{K(s+3)}{s(s+5)}$$

Jawab :

Persamaan karakteristik menjadi :

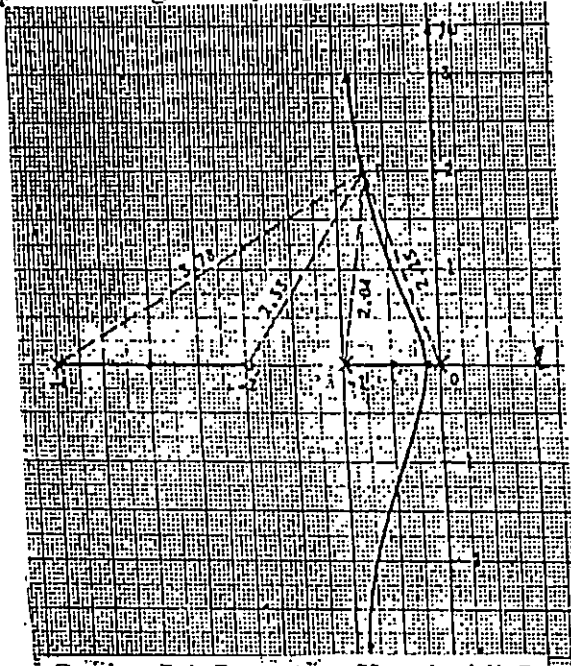
$$s(s+5) + K(s+3) = 0$$

$$\text{Maka : } K = \left| \frac{-(-9)(-9+5)}{(-9+3)} \right| = 6$$

- II. Apabila titik K tidak terletak pada sumbu nyata, cara grafik akan lebih sederhana. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

- 1) Gambarkan vektor-vektor dari semua kutub lup terbuka terhadap titik tersebut.
- 2) Ukur panjang semua vektor itu dan kalikan semuanya

- 3) Gambarkan vektor-vektor dari semua loop terbuka terhadap titik tersebut.
- 4) Ukur panjangnya dan kalikan semuanya
- 5) Untuk mendapatkan K bagi hasil yang didapat pada 2 dan 4.



Contoh : Gambar 7.4. Penentuan K pada titik P .

Tentukan nilai K pada titik P dari TK akar-akar pada gambar.

Jawab : Dari gambar 7.4 nilai K pada titik P adalah sebagai berikut :

$$K = \frac{2.15 \cdot 2.04 \cdot 3.78}{2.33} = 7.114$$

contoh :

Terangkan dengan bantuan sketsa bagaimana penempatan sebuah sistem pengaturan dapat diprediksi dari sebuah diagram TK akar-akar.

Sebuah sistem pengaturan dengan feedback negatif mempunyai fungsi alih lintasan maju sebagai berikut.

$$\frac{K}{s(s+1)(s+3)}$$

Penyelesaian

Kesulitan utama dalam analisa sistem pengaturan adalah menentukan akar-akar persamaan differensial berorder banyak (lebih dari 3) yang dapat menjelaskan tampilan sistem tersebut.

Disamping itu, diperlukan pula melihat pengaruh perubahan parameter pada akar-akar persamaan karakteristik. Seperti dijelaskan pada awal bab ini, bahwa diagram TK akar-akar didasarkan atas posisi kutub dan zero lup terbuka pada bidang s dan memperlihatkan TK akar-akar itu yang menggambarkan fungsi parameternya yaitu penguatan lup. Sebuah sistem dikatakan Stabil pada kondisi lup tertutup ketika semua akar-akar dari persamaan karakteristik (pole lup tertutup) berada pada bagian kiri bidang S .

Jadi, diagram TK akar-akar dapat digunakan untuk menentukan batas-batas stabilitas maupun menentukan penampilan sistem di bawah kondisi lup tertutup.

Dari soal di atas 3 buah akar pole lup terbuka yaitu $S = 0$, $S = -1$, $S = -3$, dan tidak ada zero.

Oleh sebab itu ada 3 cabang TK dan asimptot yang memotong sumbu nyata adalah :

$$\sigma = \frac{[(0) + (-1) + (-3) - [(0)]]}{3 - 0} = -4/3$$

sudut asemptot yang terbentuk pada sumbu nyata adalah :

$$\alpha = \pm \frac{1 \times 180}{3} = \pm 60^\circ$$

untuk menentukan posisi titik pecah yang terletak antara 0 dan -1 , $dk/ds = 0$

$$s(s+1)(s+3) + K = 0$$

$$\text{Sehingga : } -s^3 - 4s^2 - 3s$$

$$dk/ds = -3s^2 - 8s - 3 = 0$$

maka, $s = -2,2$ atau $s = -0,45$ dari akar-akar ini, hanya titik $-0,45$ yang terletak pada 0 dan -1 , maka titik ini menjadi titik pecah (breakway point). Untuk menentukan titik potong TK akar-akar pada sumbu khayal maka digunakan aturan 9.

$$s^3 + 4s^2 + 3s + K = 0$$

$$(j\omega)^3 + 4(j\omega)^2 + 3(j\omega) + K = 0$$

atau :

$$(K - 4\omega^2) + j(3\omega - \omega^3) = 0$$

$3\omega - \omega^2 = 0$ maka $\omega = \pm\sqrt{2}$ dan dari nilai K pada titik ini adalah 12. Diagram

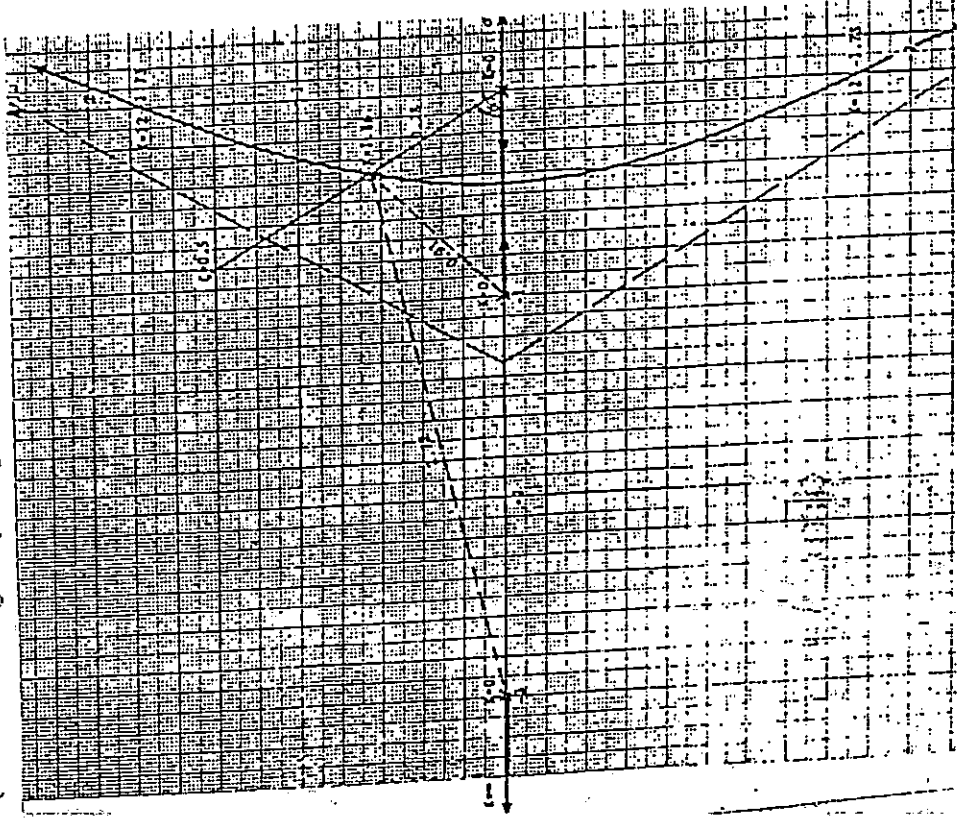
TK, akar-akar digambarkan seperti gambar 7.4.

Faktor redaman sistem = 0,5 berarti kita dapat membuat garis yang memotong sumbu nyata negatif dengan sudut $\cos^{-1}0,5 = 60^\circ$. Pemotongan garis ini dengan

TK dapat ditentukan nilai K yaitu sebesar :

$$K = (0,75) \times (0,91) \times (2,72) = 1,86$$

(dilihat dari diagram pada gambar 7.4)



Gambar 7.5. TKA dari $GH(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+3)}$

Kesimpulan

Tempat kedudukan akar-akar suatu cara grafik yang dapat dipakai untuk membuat sketsa aproksimasi dan menentukan perubahan yang cocok pada sistem dan harga-harga parameter yang bersangkutan. Cara ini sangat bermanfaat untuk membuat perancangan sebuah sistem pengaturan dengan lup tertutup.

Bahan Bacaan

Ogata Katsuhiko dan Edi Laksono, *Teknik Kontrol Automatik (Jilid I)*, 1985, Penerbit

Erlangga Jakarta, hal. 323-383

Yousefzadeh, *Basic Control Engineering*, 1979, Longman Scientific and Technical

London, p.138-146.

Soal-Soal Latihan

1. gambarkan TK A untuk fungsi alih lup terbuka berikut ini untuk sistem lup tertutup apabila harga K berubah dari 0 ke tak terhingga.

a.
$$GH(s) = \frac{K}{S(S+1)^2}$$

b.
$$GH(s) = \frac{K}{(S^2 + S + 1)(S + 1)}$$

c.
$$GH(s) = \frac{K(S+1)}{S(S+2)(S+3)}$$

d.
$$GH(s) = \frac{K(S^2 + 4S + 8)}{(S^2 + S + 4)}$$

2. Sebuah sistem unity feedback mempunyai fungsi alih lup terbuka :

$$KGH(s) = \frac{K(S+2)}{S(S+20)(S+10)}$$

Gambarkan diagram TKA dan tentukan nilai K agar memberikan frekuensi teredam alami = 2,5 rad/s. berapa besarnya perbandingan redaman dan nilai K ini.

3. Gambarkan TKA sistem pengaturan feedback yg mempunyai fungsi penguat dan feedback berikut ini.

$$G(s) = \frac{K(S+0,1)}{S^2(S+0,01)}$$

$$H(s) = 1 + 0,65$$

BAB VIII

ANALISIS FREKUENSI RESPON

Pada Bab sebelumnya, Respon dan penampilan sistem dinyatakan dengan variabel frekuensi kompleks dan kedudukan titik-titik kutub dan nol pada bidang s . Salah satu cara yang praktis untuk menganalisa dan merancang sistem yaitu dengan frekuensi respon. Tanggapan frekuensi suatu sistem didefinisikan sebagai respon keadaan mantap sistem terhadap sinyal masukan sinusoidal. Cara ini digunakan untuk menilai prestasi sebuah sistem pada frekuensi-frekuensi tertentu. Disamping itu dapat pula menganalisa pengaruh derau (noise) terhadap sistem.

Keuntungan lain yaitu fungsi alih yang melukiskan tingkah laku keadaan mantap sinusoidal dapat dipercaya dengan menggantikan s dengan $j\omega$ pada fungsi alih sistem. Melalui grafik, metode ini dapat menunjukkan cara memperbaiki/mengubah sebuah sistem.

Tujuan

Setelah mempelajari bab ini, anda dapat :

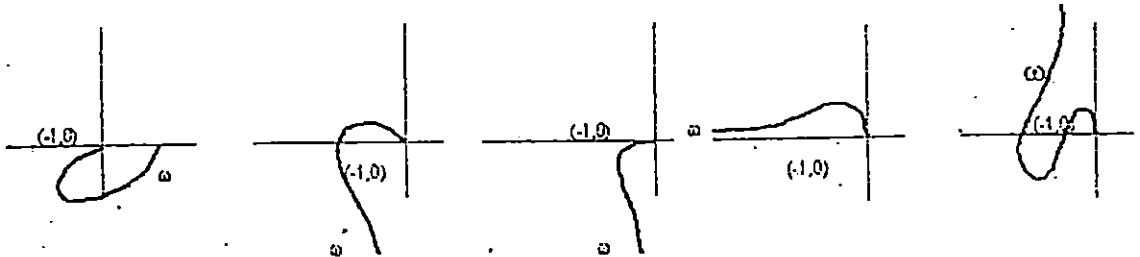
1. Menyebutkan keuntungan dan kerugian pemetaan dengan analisis frekuensi.
2. Menggambar diagram Nyquist untuk menentukan kestabilan suatu sistem.
3. Menggambar diagram Bode untuk menentukan penguatan dari fasa $G(s)$ $H(s)$ sebagai fungsi frekuensi.
4. Mengenal istilah kompensasi untuk menstabilkan sistem yang tidak stabil atau menaikkan margin stabilitas.

8.1. Kriteria Kestabilan Nyquist

Kriteria kestabilan Nyquist didasarkan atas respons frekuensi lup terbuka dan merupakan metode yang menggambarkan grafik kestabilan sistem pada kondisi lup tertutup.

Sistem lup tertutup akan stabil apabila gerakan respon frekuensi lup terbuka yang tergambar pada diagram Nyquist dengan arah frekuensi menaik sedangkan titik $(-1, j0)$ berada sebelah kiri tempat kedudukan.

Contoh :



Gambar 8.1. Respon Frekuensi Lup Terbuka

Dengan menggunakan kriteria kestabilan Nyquist maka gambar 8.1, a, c dan e dikatakan stabil sedangkan b dan d tidak stabil.

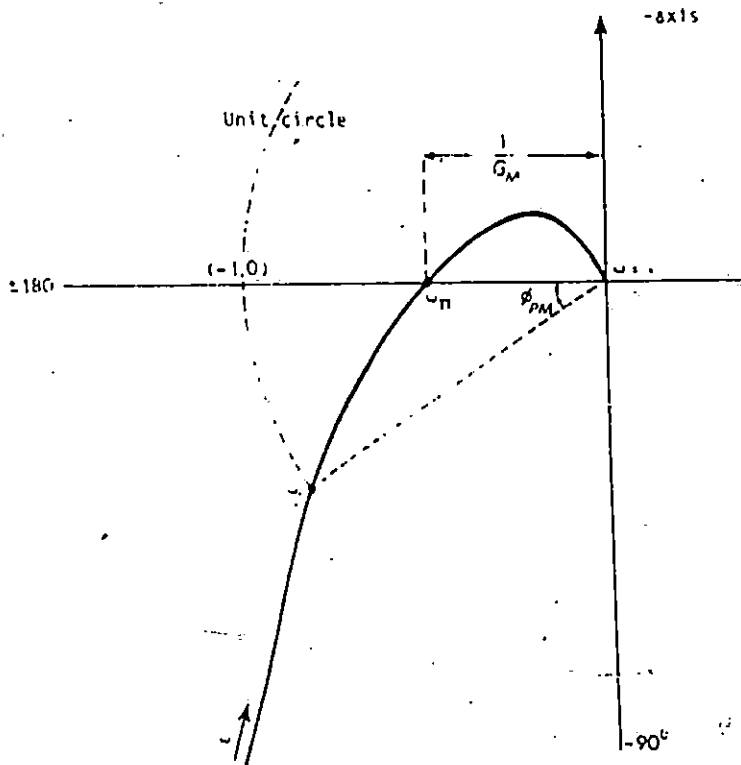
8.1.1. Kestabilan relatif

Pada suatu sistem yang stabil, selalu dilihat seberapa dekat hubungannya menjadi tidak stabil. Keadaan ini disebut Derajat Kestabilan. Kestabilan relatif sebuah sistem selalu ditentukan oleh dua parameter perencanaan : Margin fase dan Margin penguatan. Margin fase (phase margin = ϕ_{PM}) adalah 180° dikurangi sudut fase fungsi alih lup terbuka pada frekuensi saat penguatannya unity (frekuensi crossover) atau

$$\gamma = 180^\circ + \phi$$

Andaikata ϕ terus naik dan fase margin negatif, maka sistem menjadi tidak stabil. Margin penguatan (Gain Margin = GM) adalah kebalikan dari besarnya fungsi alih lup terbuka ketika fase bergeser 180° . Margin penguatan biasanya dinyatakan dalam dB dan apabila harganya negatif, maka sistem tidak stabil.

Frekuensi pada saat penguatan unity disebut frekuensi penguatan Crossover = ω_1 dan frekuensi pada sudut fase = 180° disebut frekuensi fase crossover ω_x .



Gambar 8.2. Margin Fase dan Margin Penguatan Sistem yang Stabil.

Contoh 1 :

Sebuah sistem mempunyai frekuensi lup terbuka seperti berikut :

ω (rad/s)	2	3	4	5	6	8	10	20
G	2,8	1,9	1,3	0,9	0,68	0,4	0,26	0,12
ϕ (derajat)	-120	-130	-140	-149	-157	-170	-180	-200

Gambarkan diagram Nyquist dan tentukan margin fase dan margin penguatan sistem tersebut. Apakah stabil pada kondisi lup tertutup ?

Penyelesaian :

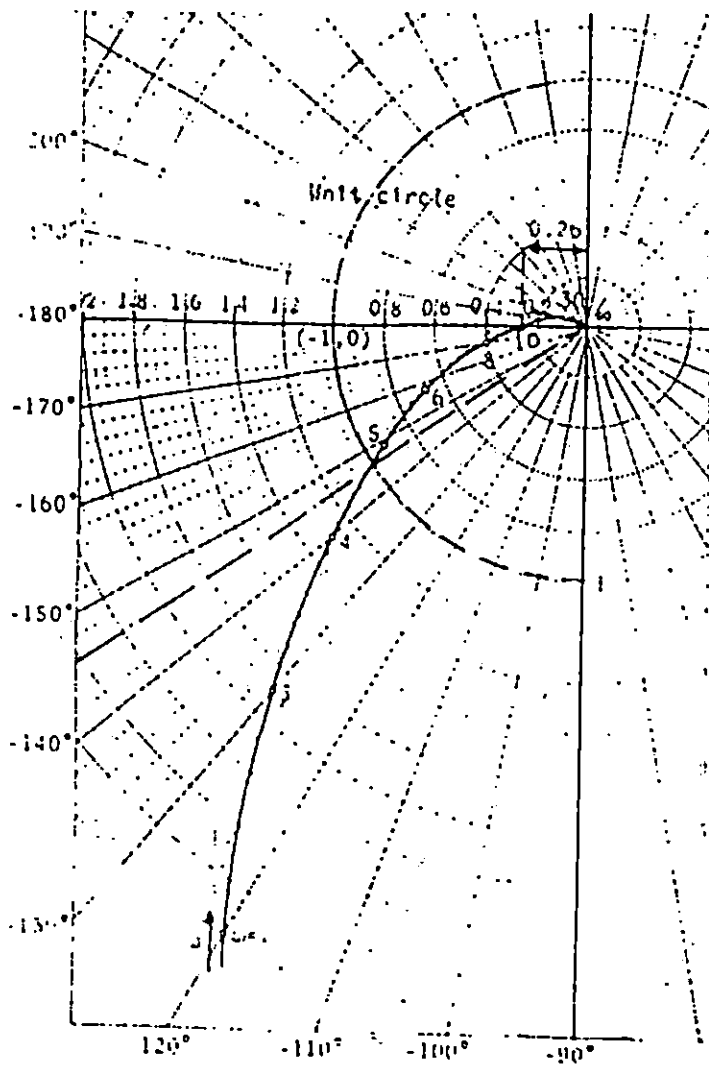
Diagram Nyquist digambarkan pada gbr. 8-3. Dari diagram tersebut didapat

Margin fase $\phi_{pm} = 180 - 146 = + 340$

Margin penguatan $GM = 1/0.26 = 3.85$

$$20 \log 10^{3.85} = 11.7 \text{ dB}$$

Sistem stabil pada kondisi lup tertutup.



Gambar 8.3. Diagram Nyquist untuk contoh 1

Contoh 2

Sebuah sistem pengaturan feedback mempunyai fungsi alih.

$$G(s) = \frac{50}{s(1 + 0.1s)(1 + 0.5s)}$$

Gambarkan diagram Nyquist, tentukan ϕ_{pm} dan GM, kemudian diskusikan apakah sistem tersebut stabil dan berikan alasannya.

Penyelesaian :

Ganti bilangan s dengan $j\omega$ dari $G(s)$ dan buat tabel seperti berikut :

Dari Diagram Nyquist yang digambarkan pada gambar 8.3, didapat

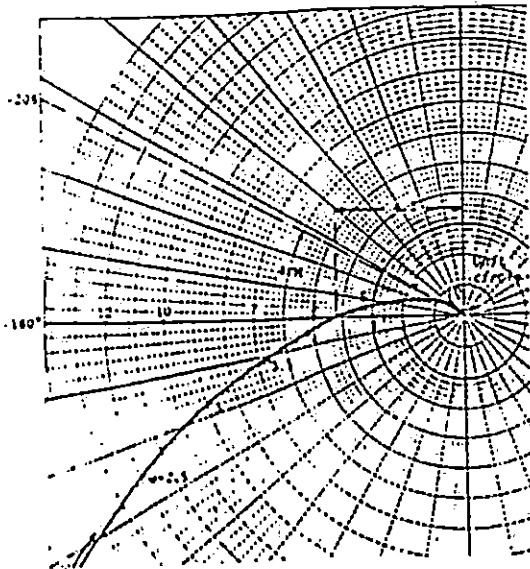
ω (rad/s)	$(j\omega)$	$(1+j0.1\omega)$	$(1+j0.5\omega)$	$ G /\angle^\circ$
1.0	$1/90^\circ$	$1/6^\circ$	$1.12/27^\circ$	$44.6/-123^\circ$
2.0	$2/90^\circ$	$1.02/11^\circ$	$1.41/45^\circ$	$17.4/-146^\circ$
2.5	$2.5/90^\circ$	$1.03/14^\circ$	$1.62/51^\circ$	$12/-155^\circ$
3.0	$3/90^\circ$	$1.04/17^\circ$	$1.8/56^\circ$	$8.9/-163^\circ$
3.5	$3.5/90^\circ$	$1.06/19^\circ$	$2.01/60^\circ$	$6.7/-169^\circ$
4.0	$4/90^\circ$	$1.08/22^\circ$	$2.23/63^\circ$	$5.2/-175^\circ$
5.0	$5/90^\circ$	$1.12/27^\circ$	$2.69/68^\circ$	$3.3/-185^\circ$
7.0	$7/90^\circ$	$1.22/35^\circ$	$3.64/74^\circ$	$1.6/-199^\circ$
10	$10/90^\circ$	$1.41/45^\circ$	$5.1/79^\circ$	$0.69/-214^\circ$
20	$20/90^\circ$	$2.23/63^\circ$	$10.05/84^\circ$	$0.11/-237^\circ$

$$\text{Margin fase } \phi_{pm} = 180 - 208 = -28^\circ$$

$$\text{Margin penguat GM} = \frac{1}{4.2} = 0.238$$

$$= \frac{1}{4.2} = 0.238$$

$$= 20 \log_{10} 0.238 = -12.47 \text{ dB}$$



Gambar 8.4. Diagram Nyquist untuk contoh 2

Kedua margin fase negatif berarti ketika fase 180° penguatan lebih dari unity, maka sistem tersebut *Tidak Stabil*.

Berdasarkan kriteria kestabilan Nyquist nampak bahwa gerakan frekuensi respon nya menarik, tidak $(-1, j0)$ berada disebelah kanan.

8.1.2. Lingkaran Fase dan Penguatan

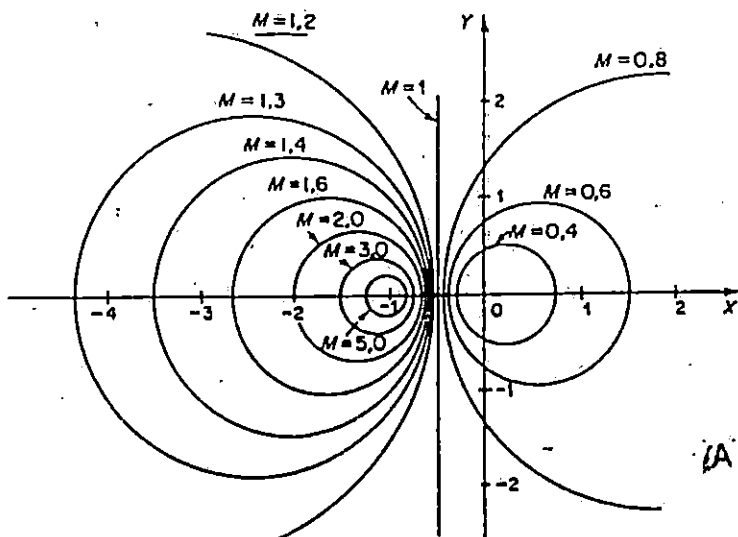
Dari frekuensi lup terbuka memungkinkan untuk menentukan besar dan fase tingsi alih lup tertutup sistem dengan menggunakan garis amplitude konstan dan garis sudut fase konstan. Untuk mencari tempat kedudukan besaran lingkaran M konstan, digambarkan sebagai berikut.

$$\text{Jari-jari } \left| \frac{M}{M^2 - 1} \right| \text{ dan pusatnya pada } \left[\frac{-M^2}{(M^2 - 1)}, 0 \right]$$

Dengan cara yang sama, maka lingkaran N dapat digambarkan dengan besaran sbb :

$$\text{Jari-jari } \frac{\sqrt{(N^2 + 1)}}{2N} \text{ dan pusatnya pada } \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}N \right)$$

Dari data pada appendik 2, keluarga lingkaran M dan N dapat digambarkan seperti gambar 8.5 dan 8.6.



Gambar 8.5 Lingkaran Keluarga M Konstan

= 8 rad/det.

Diagram Nyquist digambarkan pada gambar 8.7, untuk mendapat nilai maksimum M , perlu dicari lingkaran M dan perpotongannya dengan diagram. Dengan cara coba-salah, didapat nilai maksimum $M=1,2$ yang memenuhi kondisi tsb., sehingga frekuensi pada saat itu

Pemecahan

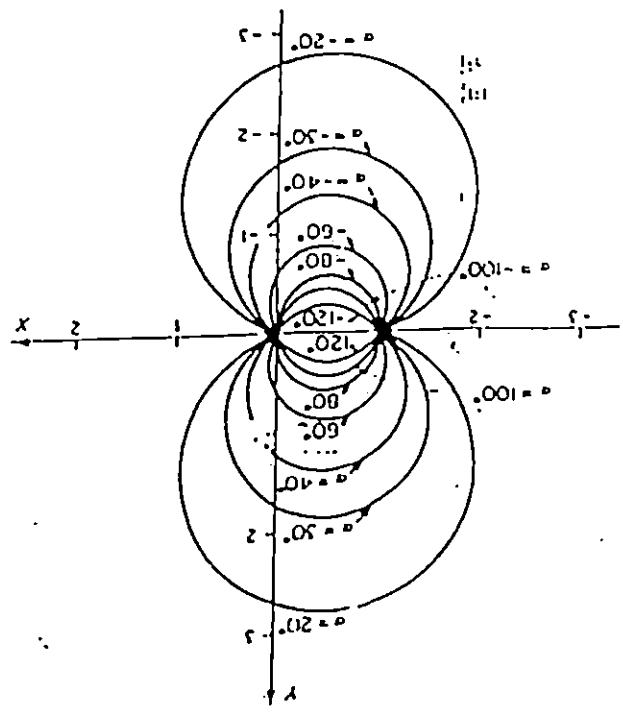
Plot diagram Nyquist dan lenkukan M dan besarnya frekuensi saat itu.

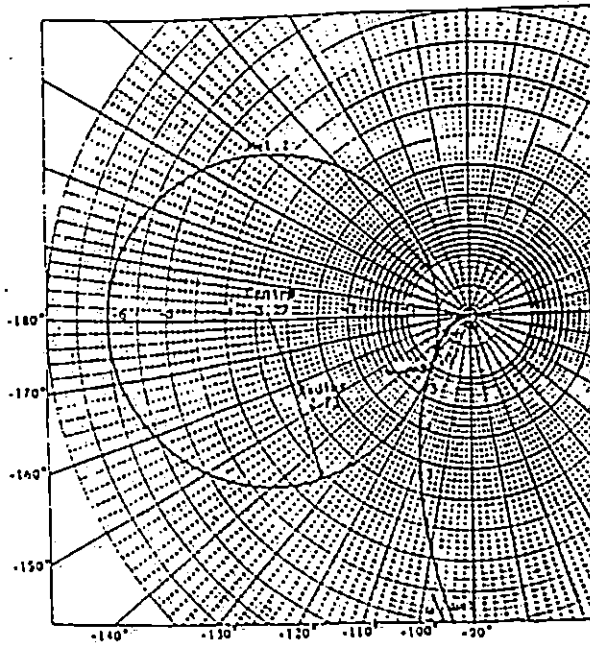
ω (rad/s)	G	ϕ (derajat)
50	0,2	-168
20	0,4	-150
10	0,88	-130
5	1,3	-122
4	2	-114
3	2,7	-108
2	3,8	-100
1	5	-94

Respon frekuensi lip terbuka sebuah sistem pengaturan adalah sebagai berikut

Contoh 3

Gambar 8.6. Lingkaran Keluarga N Konstan





Gambar 8.7. Diagram Nyquist untuk contoh 3

8.1.3. Diagram Nyquist Balik

Untuk merencanakan sebuah sistem dan menentukan ciri-cirinya sangat sering dipakai diagram Nyquist Balik. Cara ini cocok untuk sistem feedback yang terdiri dari komponen penyesuai frekuensi. Contoh berikut adalah penggunaan diagram Nyquist Balik.

Contoh 4

Respon frekuensi lup terbuka sistem pengaturan seperti dibawah ini. Gambarkan diagram Nyquist Balik dan tentukan nilai M maksimum serta frekuensi pada saat itu.

$\omega(\text{rad/s})$	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10
$ G $	5	2,5	1,72	0,96	0,67	0,51
$\phi(\text{deg})$	-110	-120	-125	-134	-140	-143

Pemecahan :

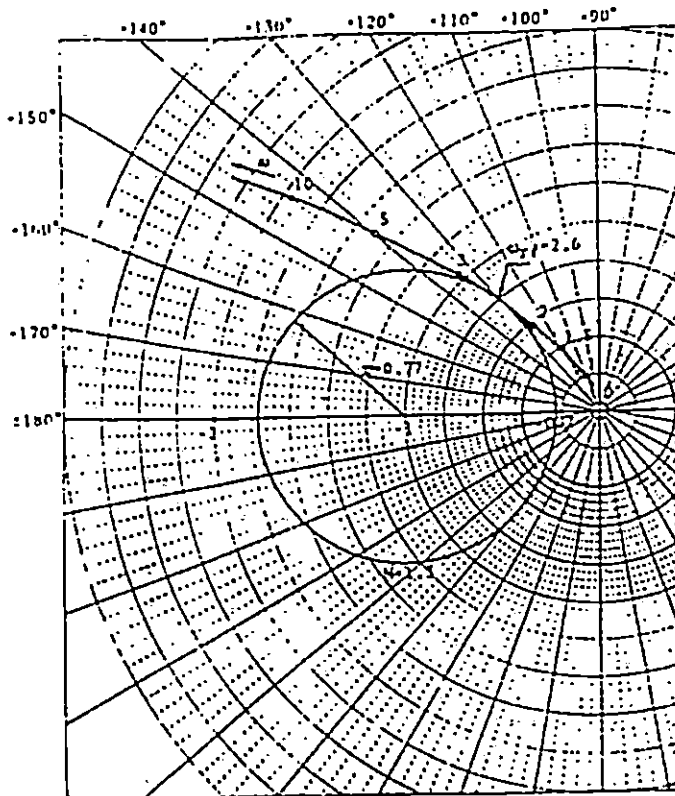
Parameter yang diperlukan untuk diagram Nyquist Balik adalah

$1/|G|$ dan $-\phi$ seperti berikut :

ω (rad/s)	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10
$1/ G $	0,20	0,40	0,58	1,04	1,50	1,96
$-\phi$ (deg)	+110	+120	+125	+134	+140	+143

Data ini digambarkan dalam diagram Nyquist balik seperti dalam gambar 8.8. Pada diagram Nyquist balik, lingkaran M selalu digambarkan pada $(-1,0)$ sebagai pusatnya. Jari-jari lingkaran sama dengan kebalikan nilai Mpf maka $Mpf = 1/r$.

Dengan demikian didapat jari-jari = 0,77 dan $Mpf = 1/0,77 = 1,33$ pada frekuensi 2,6 rad/det.



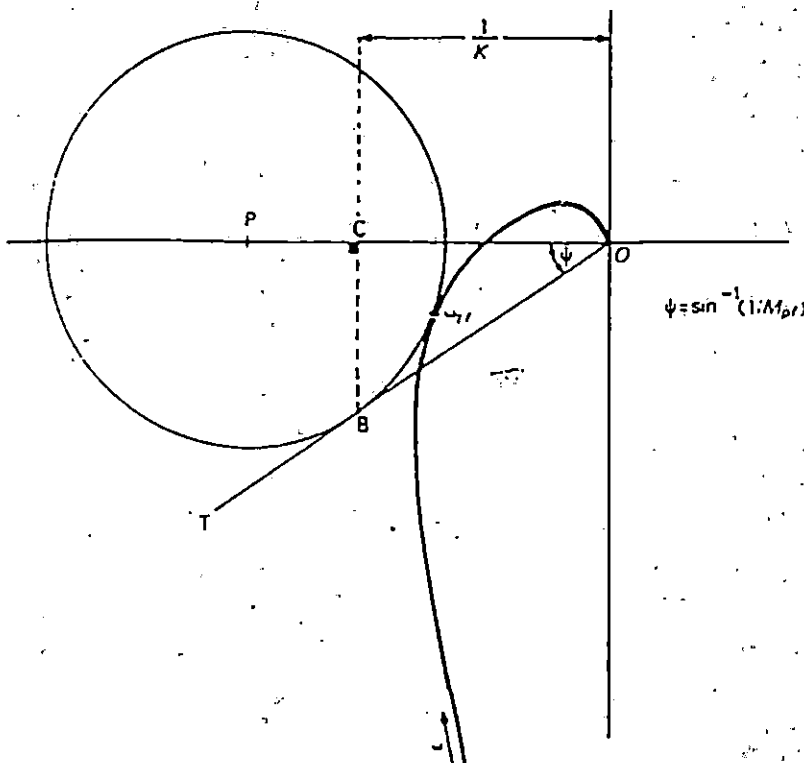
Gambar 8.8 Nyquist Balik dengan Lingkaran M

8.1.4. Konstruksi Brown

Sebuah Teknik Geometri sederhana yang dikenal dengan Konstruksi Brown dapat digunakan untuk menentukan konstanta penguatan K sebuah sistem untuk nilai Mpf yang khusus. Perhatikan gambar 8.9 dan ikuti langkah-langkah berikut :

1. Plot respons frekuensi lup terbuka (TK dari KG ($j\omega$)) untuk $K=1$

2. Tarik garis OT sehingga membentuk sudut $\psi = \sin^{-1}(1/M_{pf})$ dengan sumbu nyata negatif.
3. Gambarkan dengan mencoba-coba sebuah lingkaran yang berpusat pada sumbu nyata negatif dan memotong TK KG ($j\omega$) dan garis OF.
4. Tarik garis BC tegak lurus dengan sumbu nyata negatif.
5. Penguatan yang diperlukan untuk M_{pf} yang diinginkan adalah sebesar $1/\cos^2\psi$.
6. Titik singgung lingkaran dengan TK menunjukkan nilai ω_{cr} .



Gambar 8.9. Konstruksi Brown

Contoh 5

Fungsi alih lup terbuka unity sebuah sistem pengaturannya adalah

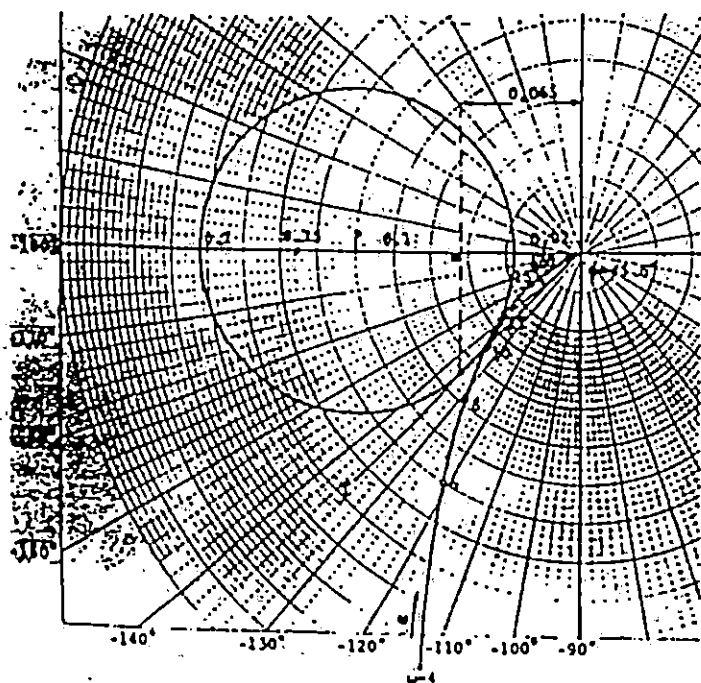
$$G(j\omega) = \frac{K}{j\omega(1 + j\omega 0,1)}$$

Tentukan penguatan K apabila $M_{pf} = 1,4$

Pemecahan :

Tabel dibawah ini menampilkan respon frekuensi lup terbuka untuk $K = 1$.

ω (rad/s)	$(j\omega)$	$(1 + j0.1\omega)$	$ G /\angle^\circ$
2	2/90°	1.02/11°	0.49/-101°
4	4/90°	1.08/22°	0.23/-112°
6	6/90°	1.17/31°	0.14/-121°
8	8/90°	1.28/39°	0.098/-129°
10	10/90°	1.41/45°	0.07/-135°
12	12/90°	1.55/50°	0.054/-140°
15	15/90°	1.8/56°	0.037/-146°
20	20/90°	2.23/63°	0.022/-153°
50	50/90°	5.1/79°	0.004/-169°



Gambar 8.10. Konstuksi Brown untuk contoh 5

Maka $\psi = \sin^{-1}(1/MpI) = \sin^{-1}(1/1,4) = 45,6^\circ$

Diagram Nyquist dan Konstruksinya diplot seperti gambar 8.10

Jadi $K = 1/0,005 = 15,4$

8.2. Bode-Plot

Seperti halnya pada cara Root Locus, maka cara Bode Plot menggunakan open loop fungsi alih untuk menentukan performen karakteristik. Pada umumnya lup terbuka fungsi alih dapat ditulis sebagai berikut :

$$GH(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)\dots\dots\dots}{s(s + p_1)(s + p_2)\dots\dots\dots}$$

Untuk frekuensi respons S diganti $j\omega$, maka :

$$GH(j\omega) = \frac{K(j\omega + z_1)(j\omega + z_2)\dots\dots\dots}{j\omega(j\omega + p_1)(j\omega + p_2)\dots\dots\dots}$$

$$GH(j\omega) = \frac{K^1(j\omega T_1 + z_1)(j\omega T_3 + z_2)\dots\dots\dots}{j\omega(j\omega T_2 + p_1)(j\omega T_4 + p_2)\dots\dots\dots}$$

Dimana

$$T_1 = 1/Z_1, \quad T_3 = 1/Z_2$$

$$T_2 = 1/p_1, \quad T_4 = 1/p_2$$

$$K^1 = \frac{Kz_1 z_2 \dots\dots\dots}{p_1 p_2 \dots\dots\dots}$$

$$\text{Logaritma dari } 20 \log_{10} GH = 20 \text{ Log}_{10} |GH| < \infty$$

Dimana :

$$20 \text{ Log}_{10} |GH| = 20(\text{Log } K^1 + \text{Log } |j\omega T_1 + 1| + \text{Log } |j\omega T_3 + 1| \dots\dots\dots \\ - \text{Log } j\omega - \text{Log } |j\omega T_2 + 1| - \text{Log } |j\omega T_4 + 1| \text{ decibel (dB)})$$

Untuk menggambarkan kurva frekuensi respons, terlebih dahulu digambar magnitudenya dan kemudian sudut fasanya.

8.2.1. Cara Menggambar Magnitude

Cara menggambaranya tergantung dari bentuk fungsi alihnya.

Fungsi Alih suatu konstanta K.

$$20 \log |GH| = 20 \log K \text{ dB}$$

Sebuah garis horizontal dan memotong sumbu vertikal pada $20 \log K \text{ dB}$

Fungsi alih $GH = (j\omega T + 1)$

$$20 \log |GH| = 20 \log (j\omega T + 1)$$

Pertama-tama dicari garis-garis asimptot :

a. untuk ω kecil sekali, $j\omega T \ll 1$

$$20 \log |GH| = 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

Garis 0 dB . Adalah garis asimptot untuk ω kecil

b. Untuk ω besar, $j\omega T \gg 1$

$$20 \log |GH| = 20 \log j\omega T$$

$$\omega = 1/T, 20 \log GH = 0 \text{ dB}$$

$$\omega = 2/T, 20 \log GH = 20 \log 2 \approx 6 \text{ dB}$$

$$\omega = 4/T, 20 \log GH = 20 \log 4 \approx 12 \text{ dB}$$

Maka asimtot untuk ω besar dapat didekati oleh garis lurus yang disebut garis 6 dB/octave. Dua frekuensi dikatakan mempunyai perbedaan n oktaf bila :

$$\omega_1 = (2 \omega_2)^n$$

$N = 0$ dikatakan ω_1 berbeda n oktaf di atas ω_2

$N = 0$ dikatakan ω_1 berbeda n oktaf dibawah ω_2

c. Setelah asimtot -2 digambar kemudian dibuat gambar yang lebih teliti.

Pada :

$$\omega = 1/T \text{ (disebut break- frekuensi)}$$

$$20 \log |GH| = 20 \log |j+1| = 20 \log \sqrt{2} \approx 3 \text{ dB}$$

Pada :

$$\omega = 2/T \text{ (satu oktaf diatas break-frekuensi)}$$

$$20 \log |GH| = 20 \log |j2+2| = 20 \log 0 \sqrt{5} \approx 7 \text{ dB}$$

Pada :

$$\omega = 1/2T \text{ (satu oktaf dibawah break-frekuensi)}$$

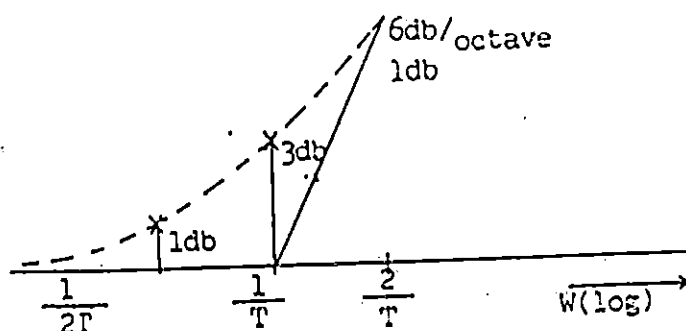
$$20 \log |GH| = 20 \log |j/2 + 1| = 20 \log \sqrt{5/4} \approx 1 \text{ dB}$$

Jadi gambar yang sebenarnya (lihat gambar 8.11) berbeda dengan garis asimtot sebagai berikut :

Pada break frekuensi sebesar 3 dB

Pada satu oktaf diatas break frekuensi sebesar 1 dB.

Pada satu oktaf dibawah break frekuensi sebesar 1 dB.



(Gambar 8.11.)

d. Fungsi Alih GH $\frac{1}{j\omega + T + 1}$

$$20 \log |GH| = -20 \log |j\omega T + 1|$$

Maka cara menggambar sama seperti diatas hanya diberi tanda negatif, sehingga garis-garis asimptotnya :

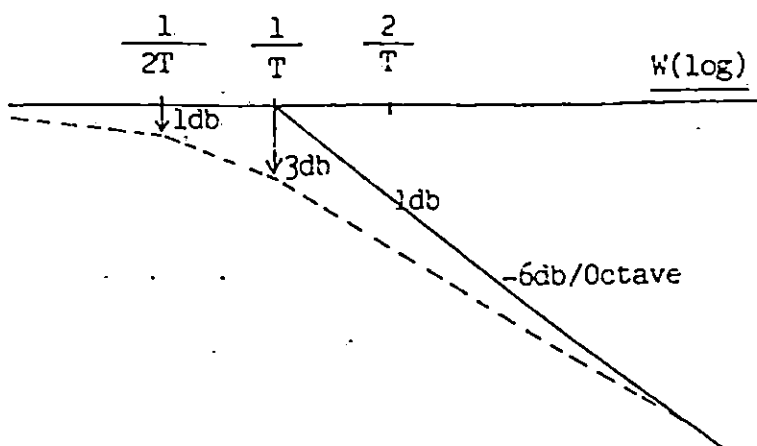
ω kecil garis 0 dB

ω besar garis -6 dB/oktaf

Pada break frekuensi -3 dB

Pada satu oktaf diatas break frekuensi -1 dB

Pada satu oktaf dibawah break frekuensi -1 dB



Gambar 8.12

e. Fungsi Alih GH = $j\omega T$

$$20 \log GH = 20 \log |j\omega T|$$

ini adalah merupakan garis 6 dB/oktaf yang melalui titik $\omega = 1/T$.

Lihat gambar 8.13.....

$$20 \log GH = -20 \log |j\omega T|$$

ini adalah merupakan garis -6 dB/oktaf yang melalui titik $\omega = 1/T$

8.2.2. Cara Menggambar Sudut Fasa

Dalam menggambar kurva sudut fasa, titik demi titik frekuensi demi frekuensi, harus dihitung karena garis-garis asimptot tidak mempunyai arti yang penting. Tetapi beberapa fungsi alih dapat digambar dengan alat yang disebut template. Kita tidak

usaha menghitung sudut setiap titik dari setiap fungsi alih. Cara membuat template adalah sebagai berikut :

Misal $GH = j\omega T + 1$

Maka $\phi = \angle GH = \tan^{-1} \omega T$

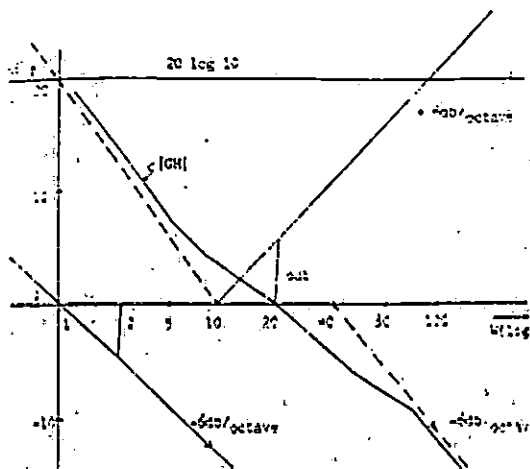
Kita hitung sudut fasa setiap titik dan kemudian dibuat tabel.

Contoh : Sebuah sistem pengaturan mempunyai fungsi alih lup terbuka :

$$GH(s) = \frac{40(s+10)}{s(s+40)} \quad \text{atau} \quad GH(j\omega) = \frac{10(j\omega+10+1)}{j\omega(j\omega+40+1)}$$

8.2.3. Kurva Magnitude

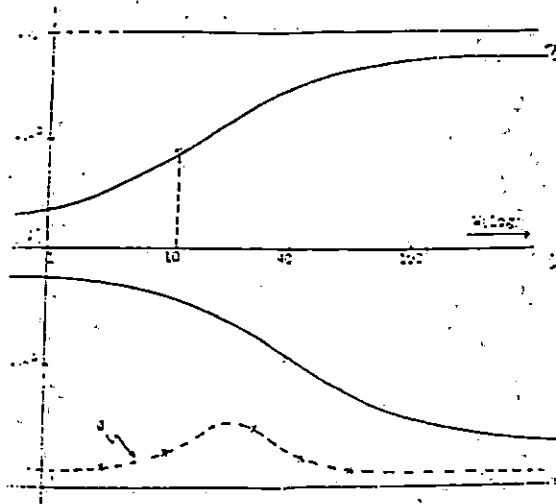
1. Tentukan break frekuensi : 10 dan 40
2. Tentukan garis-garis asimptot dari $(j\omega + 1/10 + 1)$ dan $(j\omega + 1/40 + 1)$
3. Tentukan kurva untuk $1/j\omega$, yaitu garis -6 db/oktaf melalui titik $\omega = 1$
4. Tentukan kurva untuk $20 \log 10 = 20$ db, garis horizontal yang memotong sumbu vertikal pada titik : 20-db.
5. Jumlahkan semua garis-garis dari 2, 3 dan 4. Dalam perjumlahan ini garis 6 db/oktaf + garis -6 db/oktaf menjadi garis 0 db.
6. Setelah garis - 2, 5 didapat kemudian perubahan pada titik-titik yang penting (break frekuensi, satu oktaf dibawah dan diatasnya) digambar sehingga terdapat kurva yang sebenarnya (lihat gambar 8.13)



Gambar 8.13

Kurva sudut fasa :

1. Tentukan break frekuensi : 10 dan 40
2. Gunakan template pada kedua frekuensi untuk menggambar kurva sudut fasa dari $(j\omega 1/10-1)$ dan $(j\omega 1/40+1)$
3. Kurva sudut fasa dari $1/j\omega$ adalah garis horizontal yang memotong sumbu vertikal pada 90° .
4. Jumlahkan titik demi titik dari kurva 2 dan 3. Hasilnya terlihat pada gambar 8.14.



Gambar 8.14

8.2.4. Bentuk Kuadrat

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Bila $\zeta = 1$ }

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_n^2}{(s + s_1)(s + s_2)}$$

$\zeta > 1$ }

s_1 dan s_2 nyata

$$= \frac{k}{(\frac{s}{s_1} + 1)(\frac{s}{s_2} + 1)}$$

Bentuk $(\frac{s}{s_1} + 1) = (j\omega T + 1)$ bode plot dapat digambarkan bila $0 < \zeta < 1$

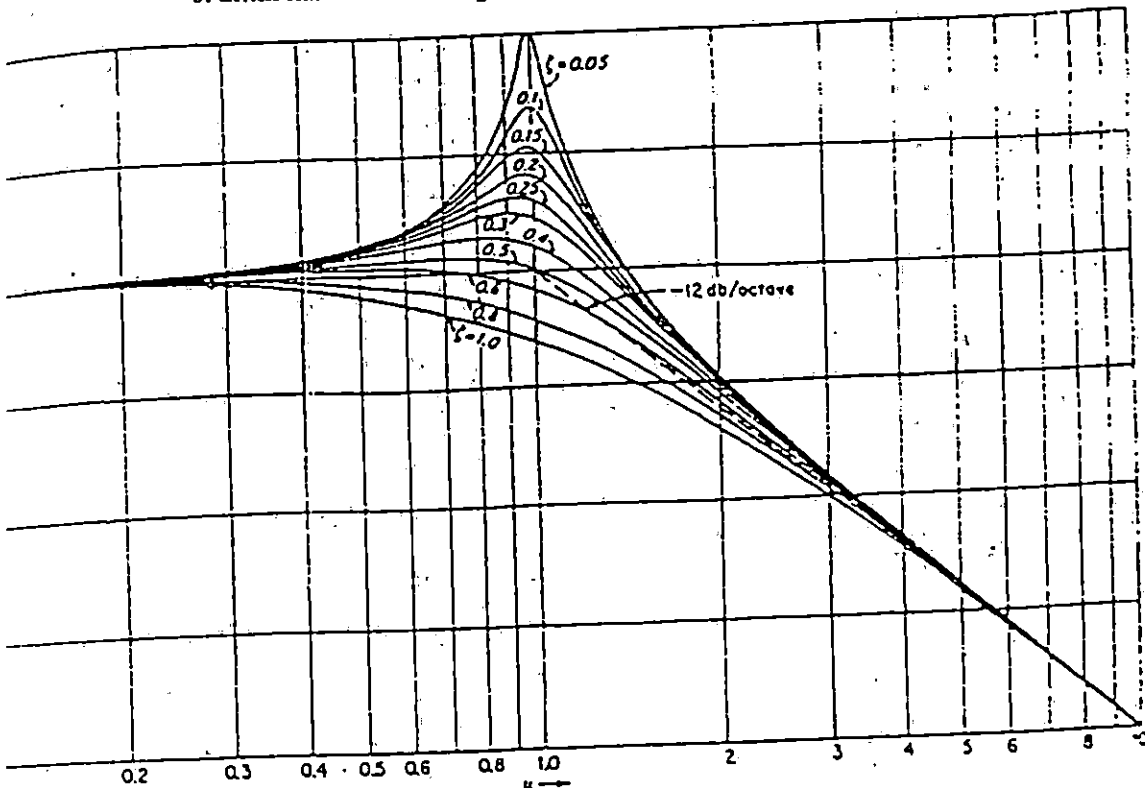
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_n^2}{(s + s_1)(s + s_2)}$$

s_1 dan s_2 tidak nyata karena $\omega_n^2 > 2\zeta > \omega_n$

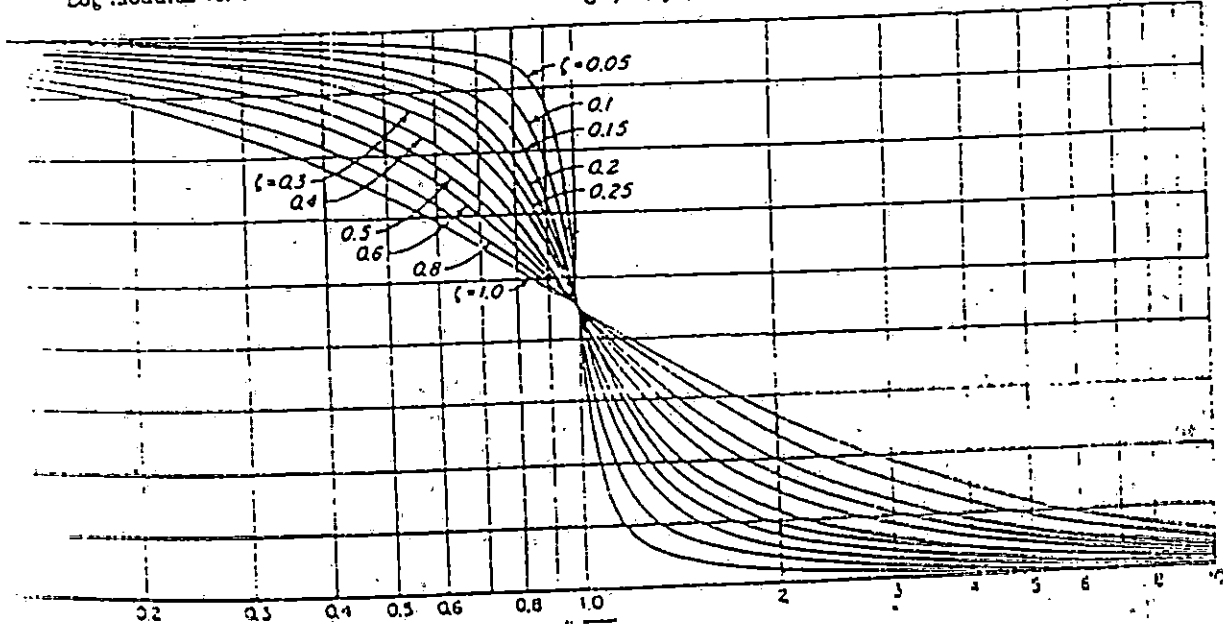
maka untuk $0 < \zeta < 1$, $G(s)$ digambar dengan kurva standar (gambar 8.15).

absis kurva standar $\frac{\omega}{\omega_{nb}}$

ordinat kurva standar d_B



Log modulus vs. u for various values of ζ for $T = \frac{1}{(ju)^2 + j2\zeta u + 1} = \frac{1}{1 - u^2 + j2\zeta u}$ where $u = \omega/\omega_{nb}$.



Phase shift vs. u for various values of ζ for $T = \frac{1}{(ju)^2 + j2\zeta u + 1} = \frac{1}{1 - u^2 + j2\zeta u}$ where $u = \omega/\omega_{nb}$.

Gambar 8.15.

8.2.5. Kurva Standar Untuk Bentuk Kuadrat

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_n j\omega + \omega_n^2} = \frac{1}{(j\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2\zeta j\frac{\omega}{\omega_n} + 1}$$

$$20 \text{ Log } G(j\omega) = 20 \text{ Log } \frac{1}{(j\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2\zeta j\frac{\omega}{\omega_n} + 1}$$

$$\text{tinjau } 20 \text{ Log } (j\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2\zeta j\frac{\omega}{\omega_n} + 1 = 20 \text{ Log } G_1(j\omega)$$

$$\text{untuk } \frac{\omega}{\omega_n} \ll 1 \longrightarrow 20 \log |G_1(j\omega)| = 20 \text{ Log } 1 = 0 \text{ dB}$$

$$\text{untuk } \frac{\omega}{\omega_n} \gg 1 \longrightarrow (\frac{\omega}{\omega_n})^2 \gg 1 \quad (\frac{\omega}{\omega_n})^2 \gg \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$\therefore 20 \log |G_1(j\omega)| \approx 20 \log |(\frac{\omega}{\omega_n})^2| = 40 \log |\frac{\omega}{\omega_n}|$$

$$\text{untuk } \frac{\omega}{\omega_n} = 1 \longrightarrow 20 \log |G_1(j\omega)| = 40 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = 1 \text{ break frequency}$$

$$\text{untuk } \frac{\omega}{\omega_n} = 2 \longrightarrow \omega = 2\omega_n \text{ (octave di atas break frequency)}$$

$$20 \log G_1(j\omega) = 40 \log |2| = 12 \text{ dB}$$

8.3 Kompensasi

Istilah kompensasi selalu digunakan ketika sebuah elemen dikenal pada lintasan maju (kompensasi seri) atau lintasan feedback (kompensasi feedback) agar menstabilkan sistem yang tidak stabil atau meningkatkan margin stabilitas. Dua elemen yang paling sering digunakan adalah rangkaian phase lead dan phase lag. Pengaruh dari kedua rangkaian adalah sebagai berikut :

- a. Jaringan Feedback
 1. Kestabilan relatif diperbaiki
 2. Penguatan keseluruhan dikurangi
 3. Lebar band sistem ditambah
 4. Lonjakan menurun
 5. Waktu naik (t_r) besarnya dipercepat

- b. Jaringan Phase Lag
 1. Kestabilan relatif diperbaiki
 2. Kesalahan tunak dikurangi
 3. Lebar band sistem dikurangi
 4. Konstanta kesalahan biasanya dinaikkan
 5. Waktu respon dinaikkan

Kesimpulan

Sistem pengaturan sering kali direncanakan dengan dasar respons frekuensi. Pendekatan ini lebih sederhana dari pendekatan lain karena dalam penerapannya, respon transien sistem terhadap masukan-masukan tidak periodik lebih penting dari pada respon keadaan tunak terhadap masukan-masukan sinusoidal. Untuk tujuan itu, metode yang paling tepat adalah menggambarkan diagram Nyquist dan diagram Bode.

Bahan Bacaan

Ogata Katsuhiko dan Edi Laksono, *Teknik Kontrol Otomatik (Jilid 2)*, 1985, Penerbit Erlangga Jakarta, hal. 50-86

Widodo, R.J. *Sistem Pengaturan Dasar (diktat kuliah)*, 1976, ITB Bandung

Yonselfzadeh, *Basic Control Engineering*, 1979, Longman Scientific and Technical,

p.116-137

Appendiks 3. Kunci Jawaban Soal-soal Latihan.

lab. II

- a. 2.5 Volt/radian
- b. $V_{out} = 6$ Volt

6. $\Delta l = 2,46 \times 10^{-6}$ m dan $F = 2,037 \times 10^3$ N

lab. III

a. $\frac{10}{s(s + (s + 3))}$

b. $X(s)[Ms^2 + Bs + K] - M[sx(0^+) + \frac{dx(t)}{dt} + (0^+)] - Bx(0^+) = 3/s^2$

a. $fA(t) = -5te^{-2t} - 10e^{-2t} - 0,0315e^{-10,48t} + 10,0315e^{-1,52t}$

b. $fB(t) = -5/6 e^{-4t} + 3/2 e^{4t} - 2/3 e^t$

c. $fC(t) = 0,5 - 0,25 e^{-7,47t} - 0,250 e^{-0,53t}$

AB IV.

a. $\frac{c(s)}{R(s)} = \left[\frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H_3(s) + G_3(s)G_4(s)H_4(s) + G_1(s)G_2(s)G_3(s)H_2(s) - G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)H_1(s)} \right]$

b. $\frac{c(s)}{R(s)} = \frac{G_1G_2G_3G_4G_5G_6 + G_1G_2G_7G_8(1 + 64H_4) + G_1G_2G_3G_4G_8}{1 - (G_2G_3G_4G_5H_2 - G_3G_6H_1 - G_8H_1 + G_7H_2G_2 - G_4H_4) - G_1G_2G_3G_4G_5G_6H_3 - G_1G_2G_7G_8H_3 - G_1G_2G_3G_4G_8H_3} + \frac{(-G_4H_4)(-G_1G_2G_7G_8H_3) + (-G_4H_4)(-G_7H_2G_2) + (-G_8H_1)(-G_7H_2G_2)}{1 - (G_2G_3G_4G_5H_2 - G_3G_6H_1 - G_8H_1 + G_7H_2G_2 - G_4H_4) - G_1G_2G_3G_4G_5G_6H_3 - G_1G_2G_7G_8H_3 - G_1G_2G_3G_4G_8H_3}$

AB V

- b. 1). $\phi_o(t) = 1 - 1,1547 e^{-3t} \sin(5,196t + 60^\circ)$
- 2). 16,3%
- 3). 1,046 detik

AB VI

- a. $s_1 = s_2 = -3$
- b. $s_1 = -0,683$; $s_2 = -7,317$; $s_3 = -3$
- c. $s_1 = -3$; $s_2 = 0,5 + j 1,66$; $s_3 = 0,5 - j 1,66$.

- 2.a. $70 > K > 0$
- b. Stabil

AB VIII

- $M_{pf} = 1,8$; $\omega_{pf} = 4,4$ rad/det
- $K = 16$; $\omega_{pf} = 10,7$ rad/det