



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

STUDI METODA KENDALI H~ OPTIMAL DAN APLIKASINYA PADA *Automatic Voltage Regulator (AVR)*

SKRIPSI



**NISA MAHFUDHA WAZNI
0810952026**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2012**

LEMBAR PENGESAHAN

"Studi Metoda Kendali H~ Optimal dan Aplikasinya pada *Automatic Voltage Regulator (AVR)*"

Lulus Sidang Tugas Akhir Tanggal :

22 Oktober 2012

**Disetujui Oleh:
Pembimbing**

**Heru Dibyo Laksono, MT.
NIP. 197701072005011002**

ABSTRAK

Automatic Voltage Regulator (AVR) memegang peranan penting pada proses pembentukan profil tegangan terminal suatu generator. Banyak faktor yang dapat menyebabkan terganggunya kestabilan tegangan seperti kenaikan pembebanan saluran transmisi, kendala pengaturan daya reaktif, dinamika OLTC (*on load tap changer*) trafo dan karakteristik beban juga mempengaruhi kestabilan tegangan tersebut. Penggunaan alat penstabil tegangan otomatis adalah agar output yang dihasilkan lebih stabil dan sistem menjadi lebih kokoh (*robust*).

Tugas Akhir ini merancang dan menganalisa sebuah sistem *Automatic Voltage Regulator* menggunakan metoda H ∞ Optimal yang didukung oleh software MATLAB, yang dibandingkan dengan sistem konvensional dan sistem tanpa menggunakan metoda H ∞ Optimal. Berdasarkan hasil simulasi, metoda ini ternyata mampu menjadikan sistem bersifat kokoh dan mempunyai respon yang cepat terhadap masukan tertentu.

ABSTRACT

AVR is the most important thing in the process of generating the voltage. There is a lot of factor that may cause disruption of voltage stability, such as the increase of the load in transmission line, the change in reactive power controlling, On Load Tap Changer (OLTC) in Transformer, and the load characteristics is also affecting the voltage stability. This automatic voltage stabilizer used to generating the stable output that is more robust in overcome the disruption.

This thesis is designing and analyzing an Automatic Voltage Regulator system that is using the Optimal H_∞ control method. Design of this system is also using the simulator of MATLAB software, which is the result of the H_∞ Optimal control system will be compared to the conventional system. Based on the result of the simulation in MATLAB, this Optimal H_∞ Method proved to be able to make the system is robust and has a fast response to a particular input.

Keywords : Automatic Voltage Regulator, Stability, Robust, Optimal H_∞

4. Rekan dan teman seperjuangan dalam menyelesaikan tugas akhir, Eko Agus Tavalala, Shilvia Ona Reski, dan Olivia Fernaza. Terimakasih atas sharing-nya dan terus memberikan semangat kepada penulis.
5. Teman-teman elektro angkatan 2008 yang terus menyemangati penulis agar cepat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan baik dari segi isi, cara penyampaian maupun teknik penulisan. Oleh sebab itu segenap saran, masukan dan kritikan yang bersifat membangun dan ilmiah sangat penulis nantikan.

Akhir kata semoga tugas akhir ini mampu memberikan manfaat serta menambah pengetahuan dan wawasan, baik kepada pembaca maupun penulis sendiri.

Padang, September 2012

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Sistem Automatic Voltage Regulation (AVR)	6
2.1.1 Model Generator	7
2.1.2 Model Amplifier	8
2.1.3 Model Exciter	8
2.1.4 Model Sensor	9
2.1.5 Stabiliser	10
2.2. Diagram Blok Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator (AVR)	10
2.3. Sistem Kendali	12
2.4. Pemodelan Sistem Kendali	14
2.4.1 Fungsi Alih	14
2.4.2 Persamaan Keadaan	15
2.5. Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Waktu	16
2.6. Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Waktu	18
2.7. Analisa Kestabilan Sistem Dalam Domain Waktu	22
2.8. Analisa Domain Frekuensi	23

2.9. Diagram Bode	26
2.10. Perancangan Pengendali H_{∞} optimal	29
2.10.1 Metoda H_{∞} Optimal	29
2.10.2 Pendekatan Mixed-Sensitivity	30
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Sistem Secara Umum	31
3.2 Parameter Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)	31
3.3 Langkah-langkah Penelitian	32
3.4. Diagram Alir	34
3.5. Jadwal Penelitian	34
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Pendahuluan	36
4.2 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu tanpa Metoda H_{∞} Optimal	38
4.3 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu tanpa Metoda H_{∞} Optimal	39
4.4 Analisa Kestabilan Sistem tanpa Metoda H_{∞} Optimal dalam Domain Waktu	41
4.5 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi Tanpa Metoda H_{∞} Optimal	43
4.6 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi Tanpa Metoda H_{∞} Optimal	44
4.7 Analisa Kestabilan Sistem Tanpa Metoda H_{∞} Dalam Domain Frekuensi	45
4.8 Analisa Kekokohan Tanpa Metoda H_{∞} Optimal	46
4.9 Kriteria Perancangan Sistem Kendali dengan Metoda H_{∞} Optimal	47
4.10 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu dengan Metoda H_{∞} Optimal	48
4.11 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu dengan Metoda H_{∞} Optimal	49

4.12	Analisa Kestabilan Sistem Dengan Metoda H~ Optimal Dalam Domain Waktu.....	51
4.13	Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Frekuensi Dengan Metoda H~ Optimal.....	52
4.14	Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Frekuensi Dengan Metoda H~ Optimal.....	53
4.15	Analisa Kestabilan Sistem Dengan Metoda H~ Optimal Dalam Domain Frekuensi.....	54
4.16	Analisa Kekokohan Dengan Metoda H~ Optimal.....	55
4.17	Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Waktu Dengan Penambahan Stabilizer	56
4.18	Performansi Sistem Lingkar Tertutup dalam Domain Waktu dengan Penambahan Stabilizer	58
4.19	Analisa Kestabilan Sistem dengan Penambahan Stabilizer dalam Domain Waktu.	59
4.20	Performansi Sistem Lingkar Terbuka dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan Stabilizer.	61
4.21	Performansi Sistem Lingkar Tertutup dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan Stabilizer.	62
4.22	Analisa Kestabilan Sistem dalam Domain Frekuensi.....	63
4.23	Analisa Kekokohan Sistem.....	63
4.24	Hasil Perbandingan Perancangan Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator (AVR).....	64
BAB V	PENUTUP.....	70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran	71
LAMPIRAN A.	LISTING PROGRAM ANALISA SISTEM KENDALI AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR	74
LAMPIRAN B.	HASIL RUNNING PROGRAM SISTEM KENDALI AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Model Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Konvensional dengan Stabilizer	7
Gambar 2.2	Diagram Blok Generator	8
Gambar 2.3	Diagram Blok Amplifier	8
Gambar 2.4	Diagram Blok Exciter	9
Gambar 2.5	Diagram Blok Sensor	10
Gambar 2.6	Diagram Blok Stablizer	10
Gambar 2.7	Model Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Konvensional	11
Gambar 2.8	Diagram Blok Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Konvensional dengan Stabilizer	11
Gambar 2.9	Sistem Lingkaran Tertutup	12
Gambar 2.10	Bentuk Kurva Tanggapan Peralihan	21
Gambar 2.11	Sistem Linier Yang Tidak Berubah Dengan Waktu	24
Gambar 2.12	Margin Fasa dan Margin Penguatan dari Sistem Stabil	27
Gambar 4.1	Model Sistem Automatic Voltage Regulator Tanpa Pengendali	37
Gambar 4.2	Model Sistem Automatic Voltage Regulator dengan stabilizer	37
Gambar 4.3	Tanggapan Peralihan sistem lingkaran terbuka tanpa metode H_{∞} Optimal	38
Gambar 4.4	Tanggapan Sistem Lingkaran Tertutup tanpa Pengendali H_{∞} Optimal	40
Gambar 4.5	Tempat Kedudukan Pole-Zero DARI Sistem Lingkaran Tertutup Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal	42

Gambar 4.6	Diagram Bode Sistem Lingkar Terbuka Automatic Voltage Regulator tanpa Pengendali H_{∞} Optimal	44
Gambar 4.7	Diagram Nyquist Sistem Lingkar Tertutup tanpa Metoda H_{∞} Optimal	46
Gambar 4.8	Diagram Bode Sistem AVR tanpa Pengendali H_{∞} Optimal	47
Gambar 4.9	Tanggapan Peralihan Sistem Lingkar Terbuka dengan Metode H_{∞} Optimal	49
Gambar 4.10	Tanggapan Peralihan Sistem Lingkar Tertutup dengan Metode H_{∞} Optimal	50
Gambar 4.11	Tempat kedudukan pole-zero dari sistem lingkar tertutup dengan pengendali H_{∞} Optimal	51
Gambar 4.12	Diagram Bode Sistem dengan Pengendali H_{∞} Optimal	53
Gambar 4.13	Diagram Nyquist Sistem AVR dengan Pengendali H_{∞} Optimal	54
Gambar 4.14	Diagram Bode Sistem AVR dengan Pengendali H_{∞} Optimal	55
Gambar 4.15	Respon Sistem AVR dengan Stabilizer	57
Gambar 4.16	Tanggapan Sistem dengan Stabilizer	58
Gambar 4.17	Letak pole dan zero sistem AVR dengan Penambahan Stabilizer	59
Gambar 4.18	Diagram Bode Lingkar Terbuka dengan Stabilizer	62
Gambar 4.19	Kriteria Nyquist Sistem AVR dengan Stabilizer	63
Gambar 4.20	Diagram Bode Sistem AVR dengan Penambahan Stabilizer	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kesalahan Keadaan Mantap.....	17
Tabel 3. 1	Parameter Sistem Automatic Voltage Regulator(AVR).....	31
Tabel 3. 2	Parameter Sistem Auotmatic Voltage Regulator(AVR) dengan Penambahan Stabilizer.....	32
Tabel 4.1	Konstanta Kesalahan Sistem <i>Automatic Voltage Regulator</i> Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal.....	39
Tabel 4.2	Konstanta Kesalahan Keadaan Mantap Automatic Voltage Regulator Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal.....	39
Tabel 4.3	Performansi Sistem Lingkar Terbuka Untuk Domain Frekuensi Tanpa Metoda H_{∞}	43
Tabel 4.4.	Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Frekuensi Automatic Voltage Regulator Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal.....	45
Tabel 4.5	Konstanta Kesalahan Sistem <i>Automatic Voltage Regulator</i> Dengan Pengendali H_{∞} Optimal.....	48
Tabel 4 6	Konstanta Kesalahan Keadaan Mantap Sistem <i>Automatic Voltage Regulator</i> Dengan Pengendali H_{∞} Optimal	48
Tabel 4.7	Performansi Sistem Lingkar Tertutup dalam Domain Waktu dengan Metoda $H_{\sim}$ Optimal	50
Tabel 4.8	Akar-akar Persamaan Karakteristik Lingkar Tertutup Sistem Kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i> dengan pengendali H_{∞} Optimal	51
Tabel 4.9	Performansi sistem lingkar terbuka dalam domain frekuensi dengan metoda $H_{\sim}$ Optimal.....	53
Tabel 4.10	Nilai Parameter <i>Automatic Voltage Regulator</i> dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>	56

Tabel 4.11	Konstanta dan Kesalahan Keadaan Mantap Sistem <i>Automatic Voltage Regulator</i> dengan Stabilizer	57
Tabel 4.12	Performansi Sistem Lingkar Tertutup AVR dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>	58
Tabel 4.13	Akar-akar Persamaan Karakteristik Lingkar Tertutup Sistem Kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i> dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>	59
Tabel 4.14	Performansi Lingkar Terbuka <i>Automatic Voltage Regulator</i> dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan Stabilizer	61
Tabel 4.15	Perbandingan performansi sistem lingkar terbuka sistem kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i> dalam domain waktu	65
Tabel 4.16	Perbandingan Performansi Sistem Lingkar Tertutup Sistem Kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i> dalam Domain Waktu	65
Tabel 4.17	Analisa Kestabilan dalam Domain Waktu Menggunakan Persamaan Karakteristik	66
Tabel 4.18	Performansi Sistem Lingkar Terbuka dalam Domain Frekuensi	67
Tabel 4.19	Performansi Sistem Lingkar Tertutup dalam Domain Frekuensi	68
Tabel 4.20	Nilai Batas Kestabilan Sistem dengan Kriteria Nyquist dalam Domain Frekuensi	68
Tabel 4.21	Perbandingan Kekokohan Sistem Kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i>	69

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam pembangkitan tenaga listrik, kestabilan tegangan merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi sistem tegangan. Ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga secara keseluruhan, terutama kualitas dan kemampuan pengiriman daya dari pembangkit ke konsumen, kondisi terparah terjadinya mekanisme pelepasan beban. Dalam sistem interkoneksi skala besar, alat penstabil tegangan manual tidak pernah dipakai dan sebagai gantinya dipasang sebuah peralatan penstabil tegangan otomatis yang dinamakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) disetiap generator. Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan tegangan antara lain kenaikan pembebanan saluran transmisi, kendala pengaturan daya reaktif, dinamika OLTC (*on load tap changer*) trafo dan karakteristik beban juga mempengaruhi kestabilan tegangan tersebut. Kestabilan tegangan sistem praktis ditentukan oleh kestabilan sistem regulasi tegangan yang dilakukan oleh sistem eksitasi yang terdapat dalam generator dan beberapa rangkaian pengendali lain yang terintegrasi dalam suatu sistem. Komponen pengendalian yang terdapat pada *Automatic Voltage Regulator* (AVR) terdiri dari *amplifier*, *exciter*, generator, sensor dan pengendali. Pengendalian sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) ini bisa dilakukan dengan berbagai jenis pengendali dan metoda diantaranya pengendali Proporsional (P), pengendali Proporsional Integral

(PI), pengendali Proporsional Diferensial (PD), pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), metoda Linear Quadratic Regulator (LQR), metoda Logika Fuzzy, metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG), metoda Linear Quadratic Gaussian - Loop Transfer Recovery (LQG - LTR) dan sebagainya.

Adapun beberapa penelitian yang berkaitan dengan perancangan kendali sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) diantaranya

- Amin Setiadji dalam penelitiannya yang berjudul "*Implementasi Kontroler PID Pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Pengaturan Tegangan Eksitasi Generator Sinkron 3 Fasa*". Penelitian ini membahas sistem pengendalian eksitasi dari generator 3 fasa menggunakan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID).
- Endriyanto NW dalam penelitiannya yang berjudul "*Perencanaan Optimal Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator (AVR) Untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan Dengan Menggunakan Algoritma Genetik*". Penelitian ini membahas sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan menggunakan metoda algoritma genetik untuk mendapatkan *gain faktor* yang dapat mengoptimalkan kerja dari *Automatic Voltage Regulator* (AVR) itu sendiri.
- Heru Dibyo Laksono dalam penelitiannya berjudul "*Analisa dan Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor Arus Searah dengan Meted H_{∞}* ". Penelitian ini membahas bagaimana performansi sistem dengan menggunakan pengendali H_{∞} dibandingkan dengan sistem konvensional.

Dalam pengendalian sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) ini, ada banyak gangguan yang mungkin terjadi, sehingga perlu studi kestabilan dinamik di sekitar titik operasinya dan mencoba menganalisa tingkah laku kestabilan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menggunakan pengendali H_{∞} optimal. Metoda H_{∞} optimal ini digunakan karena metoda ini mampu menghasilkan pengendali yang bersifat kokoh (*robust*) terhadap gangguan, mampu meredam gangguan (*noise*) pada frekuensi tinggi dan mempunyai respon yang cepat terhadap masukan tertentu. Selain itu, penelitian ini merupakan perancangan tahap mula sistem kendali linier untuk mengendalikan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dalam bentuk simulasi. Syarat menggunakan metode diatas adalah model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) harus bersifat linier. Untuk mendapatkan model linier tersebut, model sistem dilinierisasi di titik operasi tertentu.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan melakukan simulasi untuk memperoleh bahan informasi perancangan pengendali dengan menggunakan metoda H_{∞} optimal yang mengendalikan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat dijadikan bahan informasi perancangan pengendali dengan menggunakan metoda H_{∞} optimal yang mengendalikan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Pada penelitian ini tidak membahas hubungan dengan pembebanan pada saluran.
2. Perancangan pengendali dan kompensator dilakukan dengan metoda H~Optimal.
3. Model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dinyatakan dalam bentuk fungsi alih.
4. Analisa dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi.
5. Analisa domain waktu dilakukan dengan menggunakan responperalihan dan respon dalam keadaan mantap.
6. Analisa domain waktu yang dilakukan meliputi performansi sistem lingkarterbuka dan performansi sistem lingkartertutup. Untuk performansi sistem lingkarterbuka terdiri dari tipe sistem, konstanta kesalahan dan kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan, laju satuan dan parabolik satuan yang diperoleh dari tanggapan dalam keadaan mantap. Untuk performansi sistem lingkartertutup yang meliputi waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum dan nilai puncak yang diperoleh dari tanggapan peralihan.
7. Analisa domain frekuensi dilakukan dengan menggunakan diagram Bode.
8. Analisa domain frekuensi yang dilakukan meliputi performansi sistem lingkarterbuka dan performansi sistem lingkartertutup. Untuk performansi sistem

lingkar terbuka yang meliputi margin penguatan (*gain margin*), frekuensi margin penguatan, margin fasa (*phase margin*) dan frekuensi margin fasa. Untuk performansi sistem lingkaran tertutup yang meliputi lebar pita (*bandwidth*), nilai magnitudo puncak dan frekuensi puncak.

9. Analisa kestabilan dalam domain waktu dilakukan dengan menggunakan kriteria Routh.
10. Analisa kestabilan dalam domain frekuensi dilakukan dengan menggunakan kriteria Nyquist.
11. Perancangan dan analisa dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika yang dipakai dalam penulisan tugas akhir ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai dasar-dasar teori dalam penelitian secara singkat meliputi generator, sistem eksitasi pada generator, sistem kendali, analisa kestabilan domain waktu dan domain frekuensi, kompensator, serta kendali H_∞ optimal.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai tahapan dan diagram alir dalam menyelesaikan penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Dalam bab ini dibahas mengenai performansi sistem, kekokohan sistem serta analisa kestabilan sistem.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran terhadap perancangan dan analisis yang telah dilakukan.

BAB II

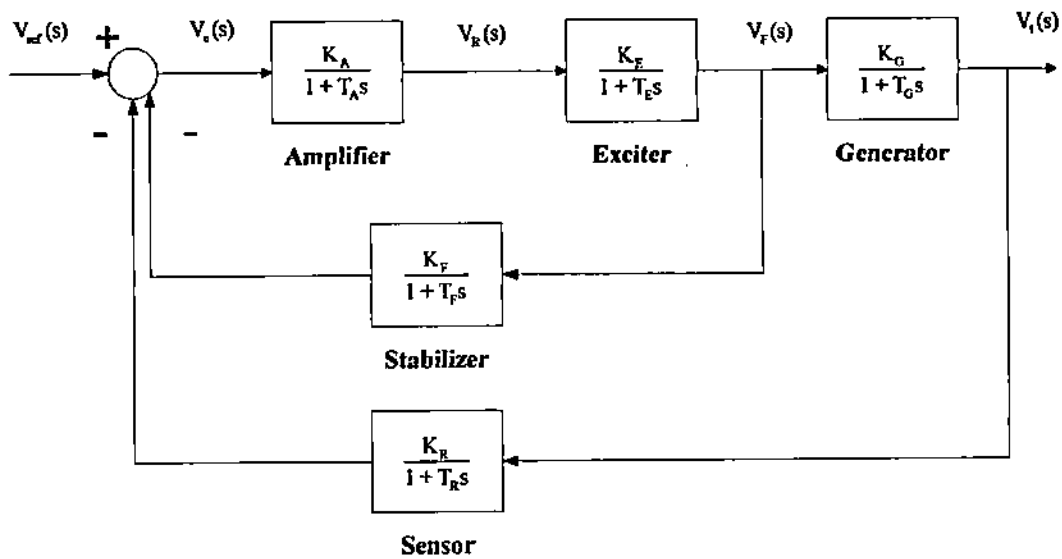
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Automatic Voltage Regulation (AVR)

Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator adalah suatu peralatan yang bertugas menjaga kestabilan dan daya reaktif generator agar tetap pada nilai kerja yang diinginkan. AVR merupakan elemen penting untuk membentuk profil tegangan terminal generator yang stabil.⁽¹⁴⁾

Suatu kenaikan daya reaktif disisi beban akan berakibat penurunan magnitude tegangan terminal. Penurunan tegangan terminal ini kemudian akan disensor oleh suatu potensial transformator. Selanjutnya tegangan terminal akan disearahkan dan dibandingkan dengan suatu titik nilai acuan. Pengatur sinyal kesalahan penguat akan mengatur tegangan eksitasi sehingga tegangan eksitasi generator akan meningkat. Jika tegangan eksitasi meningkat maka daya yang dibangkitkan oleh generator akan meningkat pula. Untuk model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan

penambahan stabilizer diperlihatkan pada Gambar 2.1 berikut, yang terdiri dari amplifier, exciter, generator, sensor dan stabiliser.⁽⁹⁾



Gambar 2.1 Model Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Konvensional dengan Stabilizer

2.1.1 Model Generator

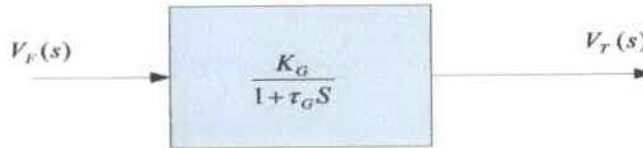
Emf yang dibangkitkan oleh generator sinkron merupakan fungsi dari proses magnetisasi, sedangkan tegangan terminal tergantung dari beban. Untuk model yang linier sebuah generator dapat didekati dengan sebuah sistem orde satu, dimana memiliki faktor penguatan K_G dan konstanta waktu T_G .

Model generator dinyatakan pada persamaan 2.1. berikut:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (2.1)$$

Konstanta K_G tergantung dari beban dan memiliki nilai antara 0.7 hingga 1.0, sedangkan konstanta waktu T_G memiliki nilai mulai dari 1.0 hingga 2.0 detik.⁽¹⁰⁾

Diagram blok generator dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut:



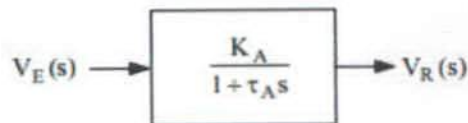
Gambar 2.2 Diagram Blok Generator

2.1.2 Model Amplifier

Dalam sistem eksitasi, *amplifier* dapat berupa *magnetic amplifier*, *rotating amplifier* atau sistem *amplifier* elektronik. Model *amplifier* direpresentasikan dalam sebuah *sistem orde satu* dengan sebuah faktor penguatan dan konstanta waktu. Fungsi alih *amplifier* dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (2.2)$$

Diagram blok *amplifier* dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut



Gambar 2.3 Diagram Blok Amplifier

Nilai K_A pada persamaan 2.1 dan gambar 2.3 tersebut akan bervariasi mulai dari 10 hingga 400, sedangkan nilai konstanta waktu sangat kecil yaitu mulai dari 0.02 hingga 1 detik.

2.1.3 Model Exciter

Exciter banyak sekali macamnya, namun dalam era modern dimana perkembangan teknologi *solid state* maju begitu pesat, maka sistem eksitasi menggunakan sumber tegangan AC yang terkontrol melalui SCR sudah banyak dijumpai. Kecepatan switching merupakan aspek yang sangat menguntungkan dari

model *exciter* elektronik. Tegangan keluaran sistem *exciter* adalah non-linier dan merupakan fungsi dari tegangan medan disebabkan efek saturasi inti magnet, sehingga dapat dilihat bahwa hubungan antara tegangan terminal dan tegangan medan *exciter* adalah sangat kompleks. Banyak sekali model yang tersedia dengan berbagai level keakuratan tersedia dalam publikasi IEEE. Model *exciter* yang modern dapat didekati dengan mengeliminasi efek saturasi tetapi dengan sangat memperhatikan konstanta waktu. Maka *exciter* dapat dimodelkan dengan sebuah sistem orde satu dimana dengan faktor penguatan K_E dan konstanta waktu T_E , yang diagram bloknya dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Diagram Blok Exciter

Dari gambar 2.4 tersebut dapat dibentuk fungsi alih sistem *exciter* pada persamaan 2.3 berikut:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (2.3)$$

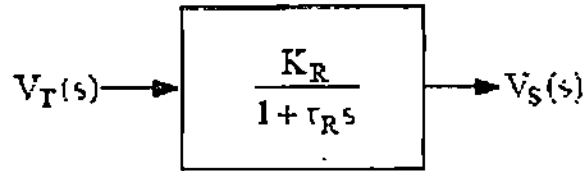
2.1.4 Model Sensor

Tegangan terminal generator disensor menggunakan sebuah trafo tegangan, dan kemudian disearahkan melalui penyearah jembatan. Sensor ini secara sederhana dimodelkan dalam sistem orde satu yaitu seperti pada persamaan 2.4 berikut:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (2.4)$$

dimana K_R memiliki nilai 10 hingga 400, dan T_R memiliki nilai 0.01 hingga 0.06.

Blok diagram sistem sensor elektronik adalah :



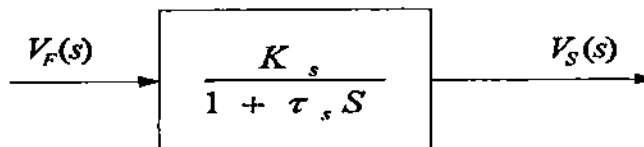
Gambar 2.5 Diagram Blok Sensor

2.1.5 Stabiliser

Fungsi stabiliser adalah untuk menambahkan sebuah zero pada fungsi alih sistem AVR *uncompensated* agar diperoleh dampak meningkatnya kestabilan relatif. Sebuah stabilizer pada dasarnya merupakan sebuah kompensator lag/lead. Fungsi alih sistem stabiliser dapat dilihat pada persamaan 2.5 berikut:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_S}{1 + \tau_S s} \quad (2.5)$$

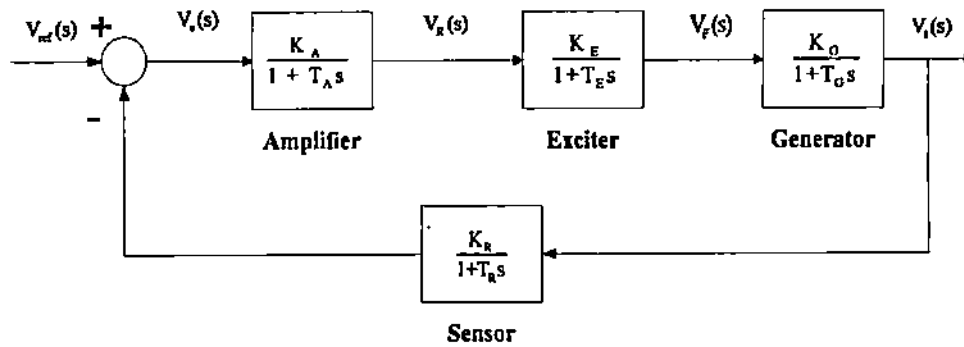
Representasi dari sistem stabilizer ini juga dapat dilihat pada gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2.6 Diagram Blok Stabilizer

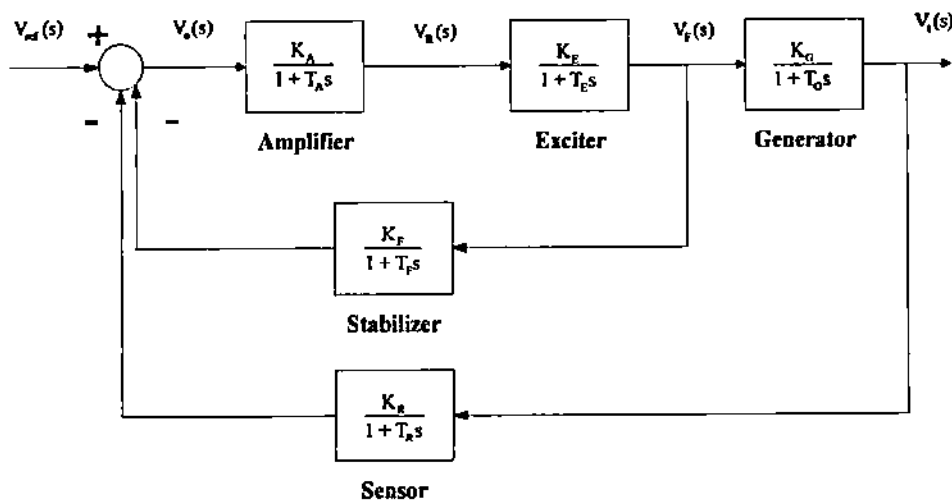
2.2. Diagram Blok Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator (AVR)

Untuk model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) konvensional tanpa stabilizer diperlihatkan pada Gambar 5. berikut:



Gambar 2.7 Model Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Konvensional

Selanjutnya akan diperlihatkan model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator konvensional yang lain dimana terdiri dari potensial transformer berfungsi sebagai alat sensor tegangan terminal, penyearah dan penguat tegangan eksitasi yang dilengkapi dengan *stabilizer* yang diperlihatkan pada Gambar 2.8. berikut:

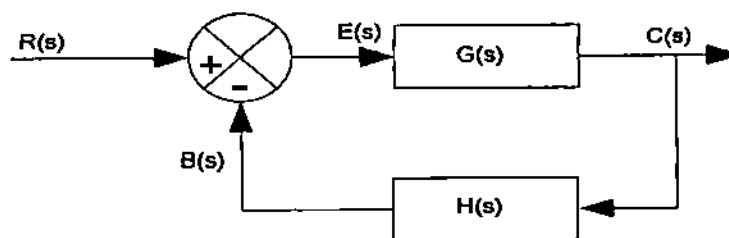


Gambar 2.8 Diagram Blok Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Konvensional dengan Stabilizer

2.3. Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan bagian yang terintegrasi dari sistem kehidupan modern saat ini. Sebagai contoh kendali suhu ruang, mesin cuci, robot, pesawat, dan lain sebagainya. Untuk analisis dan desain sistem kendali, sistem fisis harus dibuat model fisisnya. Model fisis ini harus dapat menggambarkan karakteristik dinamis sistem tersebut secara memadai. Dari model fisis diturunkan model matematis. Model matematis diartikan sebagai hubungan matematik yang menghubungkan keluaran sistem dengan masukannya. Model matematis diperoleh dari hukum-hukum fisis sistem yang bersangkutan seperti dinamika sistem mekanis yang dimodelkan dengan hukum-hukum Newton, dinamika sistem elektrik dimodelkan dengan hukum-hukum Kirchoff, Ohm dll. Model matematis digunakan untuk memperkirakan bagaimana sistem akan memberikan tanggapan pada kondisi-kondisi spesifik yang pasti tanpa menguji sistem fisik yang sebenarnya. Dengan menggunakan transformasi Laplace diperoleh nantinya fungsi alih dan persamaan keadaan (*state space*).⁽³⁾

Setiap sistem kendali dapat dinyatakan dengan suatu diagram blok yang terdiri dari beberapa blok, titik penjumlahan dan titik cabang. Adapun diagram blok sistem lingkaran tertutup dilihat pada Gambar 2.9. berikut:



Gambar 2.9 Sistem Lingkaran Tertutup

Sinyal umpan balik dinyatakan dengan persamaan (2.6) berikut:

$$B(s) = H(s)C(s) \quad (2.6)$$

Perbandingan antara sinyal umpan-balik $B(s)$ dengan sinyal kesalahan penggerak

$E(s)$ disebut fungsi alih lingkaran terbuka yang dinyatakan persamaan (2.7) berikut:

$$\frac{B(s)}{E(s)} = G(s)H(s) \quad (2.7)$$

Perbandingan antara keluaran $C(s)$ dengan sinyal kesalahan penggerak $E(s)$

disebut fungsi alih umpan maju yang dinyatakan oleh persamaan (2.8) berikut:

$$\frac{C(s)}{E(s)} = G(s) \quad (2.8)$$

Untuk sistem yang ditunjukkan pada Gambar 1. keluaran $C(s)$ dan masukan $R(s)$

dihubungkan oleh persamaan (2.9) s/d (2.11) berikut:

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.9)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2.10)$$

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] = G(s)R(s) - H(s)C(s)G(s) \quad (2.11)$$

Berdasarkan persamaan (2.11) diperoleh persamaan (2.12) berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.12)$$

Fungsi alih yang merelasikan $C(s)$ dengan $R(s)$ disebut fungsi alih lingkaran tertutup.

2.4. Pemodelan Sistem Kendali

2.4.1 Fungsi Alih

Pada Gambar 2.7 terlihat sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator dengan potensial transformer yang berfungsi sebagai alat sensor tegangan terminal. Persamaan untuk sensor tegangan diturunkan dari Gambar 2.5. pada persamaan (2.13) berikut:

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (2.13)$$

Fungsi alih lingkaran tertutup yang menghubungkan tegangan terminal (V_t) dan tegangan referensi (V_{ref}) dinyatakan dengan persamaan (2.14) berikut:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G (1 + T_R s)}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)(1 + T_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (2.14)$$

Selanjutnya akan diperlihatkan model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator konvensional yang lain dimana terdiri dari potensial transformer berfungsi sebagai alat sensor tegangan terminal, penyearah dan penguat tegangan eksitasi yang dilengkapi dengan *stabilizer*.

Untuk stabilizer dinyatakan dengan fungsi alih pada persamaan (2.16) berikut:

$$\frac{V_F(s)}{V_T(s)} = \frac{K_F}{1 + \tau_F s} \quad (2.15)$$

Fungsi alih lingkaran tertutup yang menghubungkan tegangan terminal (V_t) dan tegangan referensi (V_{ref}) dinyatakan dengan persamaan (2.17) berikut:

$$\frac{V_i(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G (1+T_R s)(1+T_I s)}{(1+T_A s)(1+T_E s)(1+T_G s)(1+T_R s)(1+T_I s) + K_A K_E K_F (1+T_G s)(1+T_R s) + K_A K_E K_G K_R (1+T_I s)} \quad (2.16)$$

2.4.2 Persamaan Keadaan

Dalam sistem kendali, persamaan keadaan merupakan metode analisis untuk sebuah sistem kendali yang kompleks. Metode ini digunakan untuk menganalisa sistem kendali dengan input yang banyak dan output yang juga banyak atau biasa disebut MIMO (*Multiple Inputs and Multiple Outputs*).

Diperlukan 3 buah variable dalam menggunakan analisis persamaan keadaan ini yaitu variable input, variable output, dan variable *state*. Adapun bentuk standar input dari persamaan keadaan ini ditunjukkan pada persamaan 2.17 berikut.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.17)$$

Dengan persamaan outputnya pada persamaan (2.18) berikut.

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (2.18)$$

Bentuk matrik dari variabel x dapat dilihat pada persamaan (2.19) berikut.

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Dimana

Matrik $A(t)$: Matrik state

Matrik $B(t)$: Matrik input

Matrik $C(t)$: Matrik output

Matrik $D(t)$: Matrik Transmisi Langsung

2.5. Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Waktu

Untuk performansi sistem lingkar terbuka, kriteria yang diukur terdiri dari tipe sistem, konstanta kesalahan dan kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan, laju satuan dan parabolik satuan yang diperoleh dari tanggapan dalam keadaan mantap.⁽¹¹⁾

Untuk tipe sistem diturunkan dari persamaan (2.20) berikut:

$$G(s)H(s) = G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_k)} \quad (2.20)$$

Ketentuan

- $k + n > m$
- $z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$ adalah zero dari $G(s) \neq 0$
- $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$ adalah pole dari $G(s) \neq 0$

Fungsi alih pada persamaan (12) melibatkan bentuk s^n pada penyebutnya dimana menyatakan pole rangkap N di titik asal. Pola klasifikasi yang sekarang ini didasarkan pada banyaknya integrasi yang ditunjukkan oleh fungsi alih lingkar terbuka. Sistem disebut tipe 0, tipe 1, tipe 2..... masing-masing jika $N=0$, $N=1$, $N=2$ Jika angka tipe diperbesar maka ketelitian menjadi semakin baik akan tetapi membesarnya angka tipe akan memperburuk persoalan kestabilan. Kompromi antara ketelitian keadaan mantap dan kestabilan relatif selalu diperlukan. Dalam praktek jarang sekali dijumpai sistem tipe 3 atau lebih tinggi karena biasanya sulit untuk mendisain sistem stabil yang mempunyai lebih dari dua integrasi pada lintasan umpan maju.

Untuk perhitungan konstanta kesalahan dan kesalahan keadaan mantap dilakukan berdasarkan Gambar 1. Dan diperoleh fungsi alih antara sinyal

masukan kesalahan penggerak $e(t)$ dan sinyal masukan $r(t)$ pada persamaan (2.21) berikut:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = 1 - \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.21)$$

Dimana sinyal kesalahan penggerak $e(t)$ adalah selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik. Dengan menggunakan teorema harga akhir dapat ditentukan performansi keadaan mantap untuk sistem yang stabil karena $E(s)$ pada persamaan (2.22) dinyatakan sebagai berikut

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} R(s) \quad (2.22)$$

Sinyal kesalahan keadaan mantapnya dinyatakan pada persamaan (2.23) berikut:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.23)$$

dan pada Tabel 2.1.berikut, merupakan ringkasan kesalahan keadaan mantap sistem tipe 0, tipe 1 dan tipe 2 jika dikenai beberapa macam masukan. Harga terhingga kesalahan keadaan mantap tampak pada garis diagonal. Di atas diagonal ini kesalahan keadaan mantapnya tidak terhingga sedangkan di bawah diagonal ini kesalahan keadaan mantapnya nol.

Tabel 2.1 Kesalahan Keadaan Mantap

	Masukan undak	Masukan Laju	Masukan Percepatan
Sistem Tipe 0	$\frac{1}{1 + K}$	∞	∞
Sistem Tipe 1	0	$\frac{1}{K}$	∞
Sistem Tipe 2	0	0	$\frac{1}{K}$

Koefesien kesalahan mantap menggambarkan kemampuan sistem untuk memperkecil atau menghilangkan kesalahan keadaan mantap. Untuk itu, koefesien-koefesien tersebut merupakan indikasi performansi kesalahan keadaan mantap. Biasanya diinginkan untuk memperbesar koefesien kesalahan dengan menjaga tanggapanperalihan dalam daerah yang masih dapat diterima. Selain itu untuk memperbaiki performansi keadaan mantap,dapat dilakukan dengan menaikkan tipe sistem dengan menambah satu integrator atau lebih pada lintasan umpan maju.

2.6. Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Waktu

Untuk performansi sistem lingkar tertutup yang meliputi waktu tunda(t_d), waktu naik(t_r), waktu puncak (t_p), waktu keadaan mantap (t_s), lewatan maksimum (M_p) dan nilai puncak yang diperoleh dari tanggapan peralihan.⁽¹¹⁾

Untuk performansi sistem lingkar tertutup diturunkan dari persamaan (2.24) berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.24)$$

dimana

ζ :rasio redaman

ω_n :frekuensi tidak teredam atau frekuensi natural

Terlihat bahwa semua karakteristik sistem dari sistem orde kedua standard merupakan fungsi dari ζ dan ω_n . Tanggapan peralihan sistem kendali praktis sering menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan mantap jika nilai $\zeta < 1$ untuk masukan undak satuan. Dalam menentukan karakteristik tanggapan peralihan sistem kendali terhadap masukan undak satuan biasanya ditentukan parameter sebagai berikut:

- Waktu tunda (*delay time*) (t_d)

Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali. Waktu tunda (t_d) ini dihitung dengan persamaan (2.25) berikut:

$$t_d = \frac{1 + 0.6\zeta + 0.15\zeta^2}{\omega_n} \quad (2.25)$$

- Waktu naik (*rise time*) (t_r)

Waktu naik (t_r) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10 % sampai 90 %, 5 % sampai 95 % atau 0 sampai 100 % dari harga akhirnya. Untuk sistem orde kedua redaman kurang biasanya digunakan waktu naik 0 sampai 100 % dan untuk sistem redaman lebih biasanya digunakan waktu naik 10 % sampai 90 % . Waktu naik ini dihitung dengan persamaan (2.26) berikut:

$$t_r = \frac{1 + 1.1\zeta + 1.40\zeta^2}{\omega_n} \quad (2.26)$$

- Waktu puncak (*time overshoot*) (t_p)

Waktu puncak (t_p) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan pertama kali. Waktu puncak ini dihitung dengan persamaan (2.27) berikut:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.27)$$

- Lewatan maksimum (*maximum overshoot*) (M_p)

Lewatan maksimum (M_p) adalah harga puncak maksimum dari kurva tanggapan yang diukur dari satu. Jika harga keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan satu maka biasa digunakan persentase lewatan maksimum dengan rumusan pada persamaan (2.28) berikut:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.28)$$

- Waktu keadaan mantap (*settling time*) (t_s)

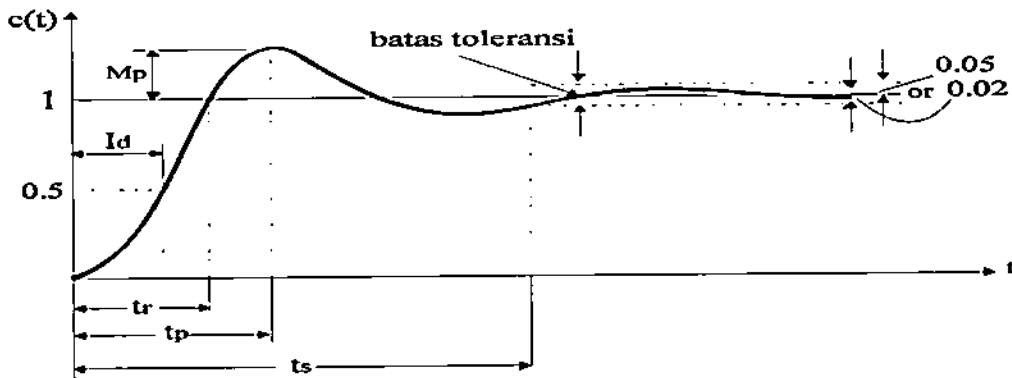
Waktu keadaan mantap (t_s) adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir biasanya 5 % atau 2%. Waktu keadaan mantap (t_s) dihitung dengan persamaan (2.30) dan (2.31) dimana untuk $0 < \zeta < 0.9$ digunakan kriteria $\pm 2\%$ maka waktu keadaan mantap (t_s) mendekati empat kali konstanta waktu dengan rumusan pada persamaan (2.29) berikut:

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (2.29)$$

untuk kriteria $\pm 5\%$ berlaku persamaan (2.30) berikut

$$t_s \approx \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (2.30)$$

Adapun bentuk kurva tanggapan peralihan diperlihatkan pada Gambar 2.10. berikut:



Gambar 2.10 Bentuk Kurva Tanggapan Peralihan

Persamaan keluaran dinyatakan dengan persamaan (2.31) berikut:

$$c(t) = 1 - \frac{1}{\beta} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\beta \omega_n t + \theta) \quad (2.31)$$

dengan $\beta = \sqrt{1 - \zeta^2}$ dan $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\zeta}\right)$.

Untuk analisa kestabilan dilakukan dengan menggunakan kriteria Hurwitz.

Berdasarkan persamaan (7) diperoleh persamaan (2.32) dan (2.33) berikut:

$$G(s)R(s) = C(s)[1 + G(s)H(s)] = 0 \quad (2.32)$$

atau

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.33)$$

Persamaan (2.33) disebut persamaan karakteristik sistem lingkaran tertutup.

Berdasarkan Persamaan (2.33) diperoleh bentuk persamaan (2.34) berikut:

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (2.34)$$

Berdasarkan persamaan (2.34) dibuat dalam bentuk determinan seperti pada persamaan (2.35) s/d (2.37) berikut:

$$\Delta_1 = a_{n-1} \quad (2.35)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix} = a_{n-1} a_{n-2} - a_n a_{n-3} \quad (2.36)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

dan seterusnya sampai Δ_{n-1} maka semua akar-akar persamaan karakteristik mempunyai bagian nyata yang negatif hanya dan hanya jika $\Delta_i > 0$ untuk $i=1,2,3,\dots,n$

2.7. Analisa Kestabilan Sistem Dalam Domain Waktu

Untuk mengetahui sistem stabil atau tidak, perlu dilakukan analisa kestabilan sistem dengan cara tertentu. Pada bagian ini, kestabilan sistem dianalisa menggunakan kriteria *Hurwitz*.

Berdasarkan persamaan (2.34) diperoleh persamaan (2.38) dan (2.39) berikut:

$$G(s)R(s) = C(s)[1+G(s)H(s)] = 0 \quad (2.38)$$

atau

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.39)$$

Persamaan (2.41) disebut persamaan karakteristik sistem lingk tertutup.

Berdasarkan Persamaan (2.41) diperoleh bentuk persamaan (2.40) berikut:

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (2.40)$$

Berdasarkan persamaan (2.40) dibuat dalam bentuk determinan seperti pada persamaan (2.41) s/d (2.43) berikut:

$$\Delta_1 = a_{n-1} \quad (2.41)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix} = a_{n-1} a_{n-2} - a_n a_{n-3} \quad (2.42)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix} \quad (2.43)$$

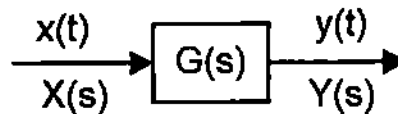
dan seterusnya sampai Δ_{n-1} maka semua akar-akar persamaan karakteristik mempunyai bagian nyata yang negatif hanya dan hanya jika $\Delta_i > 0$ untuk $i=1,2,3,\dots,n$

2.8. Analisa Domain Frekuensi

Tanggapan frekuensi adalah tanggapan keadaan mantap suatu sistem terhadap masukan sinusoidal. Dalam metoda tanggapan frekuensi, frekuensi sinyal masukan dalam suatu daerah frekuensi tertentu diubah dan tanggapan frekuensi yang dihasilkan dipelajari. Dalam menggunakan kriteria kestabilan ini tidak diperlukan untuk menentukan akar-akar persamaan karakteristik. Pengujian tanggapan frekuensi pada umumnya sederhana dan dapat dilakukan secara teliti dengan menggunakan pembangkit sinyal sinusoidal yang telah tersedia dan alat-alat ukur yang teliti.

Seringkali fungsi alih komponen yang rumit dapat ditentukan secara eksperimental dengan pengujian tanggapan frekuensi.⁽¹³⁾

Perhatikan sistem linier yang tidak berubah dengan waktu pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Sistem Linier Yang Tidak Berubah Dengan Waktu

Untuk sistem pada Gambar 2.11 berlaku persamaan (2.44) berikut

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) \quad (2.44)$$

Masukan $x(t)$ adalah sinusoidal yang dinyatakan oleh persamaan (2.45) berikut:

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (2.45)$$

Jika sistem stabil, maka keluaran $y(t)$ dapat dituliskan sebagai persamaan (2.46) berikut:

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \phi) \quad (2.46)$$

dengan

$$Y = X |G(j\omega)| \quad (2.47)$$

dan

$$\phi = \angle G(j\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{bagian imajiner } G(j\omega)}{\text{bagian riil } G(j\omega)} \right] \quad (2.48)$$

Suatu sistem linier yang tidak berubah dengan waktu yang dikenai masukan sinusoidal, pada keadaan mantap akan mempunyai keluaran sinusoidal dengan frekuensi yang sama dengan masukannya tetapi amplitudo dan fasa dari keluaran

pada umumnya berbeda dengan masukannya. Pada kenyataannya, amplitudo keluaran merupakan hasil kali amplitudo masukan dengan $|G(j\omega)|$ sedangkan sudut fasa berbeda dari masukannya sebesar $\phi = \angle G(j\omega)$. Untuk masukan sinusoidal dimana perbandingan amplitudo keluaran sinusoidal terhadap masukan sinusoidal dinyatakan dengan persamaan (2.49) berikut:

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| \quad (2.49)$$

Pergeseran fasa keluaran sinusoidal terhadap masukan sinusoidal dinyatakan dengan persamaan (2.50) berikut:

$$\angle G(j\omega) = \angle \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (2.50)$$

Dengan demikian, karakteristik tanggapan suatu sistem terhadap suatu masukan sinusoidal dapat diperoleh secara langsung dari persamaan (2.51) berikut:

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = G(j\omega) \quad (2.51)$$

Fungsi alih sinusoidal $G(j\omega)$, perbandingan $Y(j\omega)$ dengan $X(j\omega)$ merupakan besaran kompleks dan dapat dinyatakan dengan besaran dan sudut fasa dengan frekuensi sebagai parameter (sudut fasa negatif disebut fasa tertinggal dan sudut fasa positif disebut fasa mendahului). Fungsi alih sinusoidal setiap sistem linier diperoleh dengan mensubstitusikan $s = j\omega$ pada fungsi alih sistem.

2.9. Diagram Bode

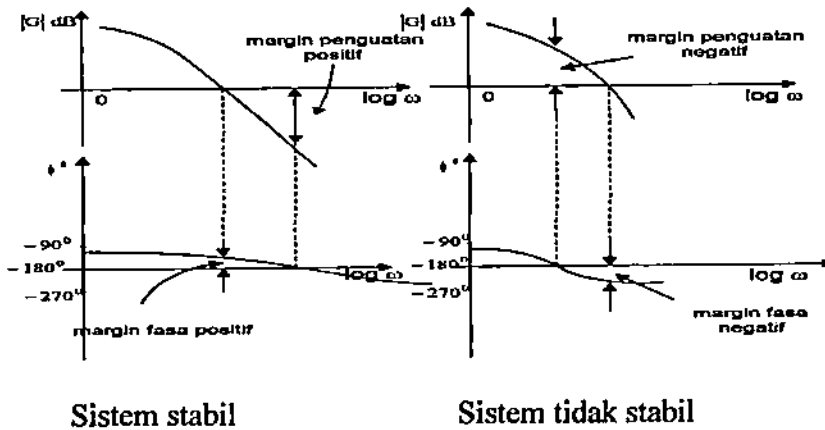
Fungsi alih sinusoidal dapat disajikan dalam dua diagram yang terpisah, satu merupakan diagram besaran terhadap frekuensi dan diagram sudut fasa dalam derajat terhadap frekuensi. Diagram Bode terdiri dari dua grafik. Grafik pertama merupakan diagram dari logaritma besaran fungsi sinusoidal, dan grafik yang lain merupakan sudut fasa di mana kedua grafik digambarkan terhadap frekuensi dalam skala logaritmik.⁽¹³⁾

Penyajian standar besaran logaritmik dari $G(j\omega)$ adalah $20 \log |G(j\omega)|$ dengan basis logaritma tersebut adalah 10. Satuan yang digunakan dalam penyajian besaran adalah desibel (dB). Pada penyajian logaritmik, kurva digambarkan pada kertas semilog, dengan menggunakan skala log untuk frekuensi dan skala linier untuk besaran (dalam dB) atau sudut fasa (dalam derajat). Dengan menggunakan diagram Bode ini diperoleh performansi sistem lingkaran terbuka dan performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi. Untuk performansi sistem lingkaran terbuka meliputi:

a. Margin Fasa (Phase Margin)

Margin fasa adalah banyaknya fasa tertinggal yang ditambahkan pada frekuensi gain crossover yang diinginkan agar sistem berbatasan dengan keadaan tidak stabil. Frekuensi gain crossover adalah frekuensi di mana $|G(j\omega)| = 1$. Margin fasa (γ) adalah sebesar 180° ditambah sudut fasa ϕ dari fungsi alih lingkaran terbuka pada frekuensi gain crossover atau $\gamma = 180^\circ + \phi$. Pada Gambar 2.12 berikut terlihat bahwa dalam diagram polar sebuah garis harus digambar dari pusat ke titik di mana lingkaran satuan berpotongan dengan diagram $G(j\omega)$. Sudut dari sumbu nyata negatif

ke garis ini adalah margin fasa. Margin fasa akan bernilai positif untuk $\gamma > 0$ dan negatif untuk $\gamma < 0$. Untuk sistem fasa minimum (tidak terdapat pole atau zero di kanan sumbu khayal bidang s) yang stabil, margin fasa harus positif. Dalam diagram logaritmik, titik kritis dalam bidang kompleks berkaitan dengan garis 0 dB dan -180° seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.12. berikut:



Gambar 2.12 Margin Fasa dan Margin Penguatan dari Sistem Stabil

b. Margin Penguatan (Gain Margin)

Margin fasa adalah kebalikan dari besaran $|G(j\omega)|$ pada frekuensi di mana sudut fasa 180° . Bila didefinisikan frekuensi phase crossover (ω_1) adalah frekuensi di mana sudut fasa fungsi alih lingkaran terbuka sama dengan 180° maka margin penguatan K_g dinyatakan oleh persamaan (2.52) berikut:

$$K_g = \frac{1}{|G(j\omega_1)|} \quad (2.52)$$

Sistem stabil dalam fasa minimum ditunjukkan oleh margin penguatannya yaitu seberapa besar penguatan dapat dinaikkan sebelum sistem menjadi tidak stabil. Sistem tidak stabil ditunjukkan oleh seberapa besar penguatan yang harus diturunkan

agar sistem menjadi stabil. Selain itu agar performansi sistem memuaskan maka diusahakan nilai margin penguatan ini besar dari 6 dB.

Untuk performansi sistem lingkaran tertutup meliputi:

a. Lebar Pita (*Bandwidth*)

Lebar pita (*bandwidth*) adalah frekuensi saat tanggapan magnituda sistem lingkaran tertutup sama dengan -3 dB. Lebar pita (*bandwidth*) ini menunjukkan sifat dari tanggapan peralihan yang berkaitan dengan kecepatan waktu naik.

b. Magnitude Maksimum (M_p)

Magnitude Maksimum (M_p) menunjukkan sifat dari tanggapan peralihan yang berkaitan dengan redaman sistem dan lewatan maksimum. Untuk sistem orde kedua hubungan antara rasio magnitude maksimum dengan redamandinyatakan pada persamaan (2.54) berikut:

$$M_p = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.54)$$

Untuk sistem orde dua nilai magnitude maksimum ini bernilai antara 1.0000 dan 1.5000 agar sistem bersifat stabil.

c. Frekuensi Puncak Maksimum (ω_r)

Untuk sistem orde kedua, frekuensi puncak maksimum dinyatakan pada persamaan (2.55) berikut:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.55)$$

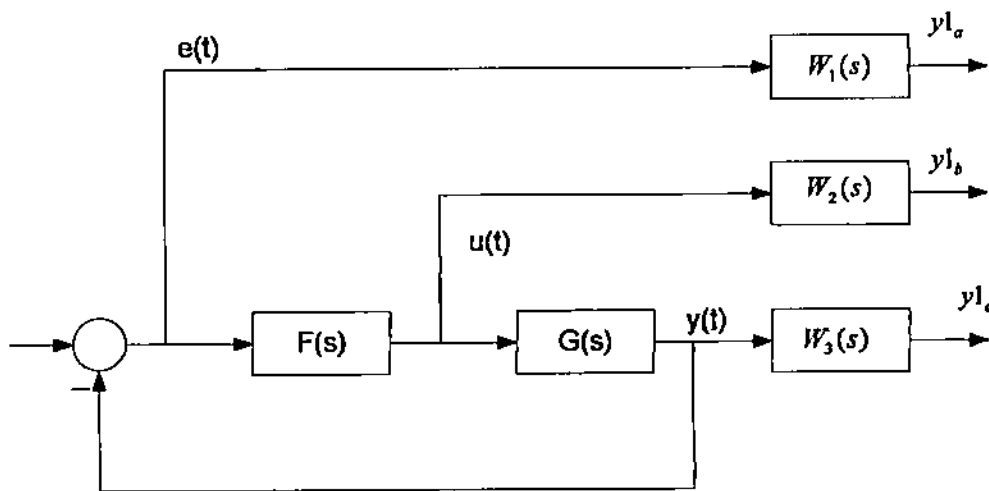
Frekuensi puncak maksimum ini berkaitan dengan kecepatan tanggapan peralihan.

2.10. Perancangan Pengendali H_∞ optimal

2.10.1 Metoda H_∞ Optimal

Metoda kendali H_∞ Optimal adalah metoda perancangan pengendali yang berbasis optimasi dan menjamin kekokohan dari sebuah sistem. Metoda H_∞ Optimal ini mengizinkan perancang untuk mengkombinasikan pencapaian tertentu dari sensitivitas (*sensitivity*) $S(s)$ dan sensitivitas komplementer (*complementary sensitivity*) $T(s)$. Sensitivitas $S(s)$ dan sensitivitas komplementer $T(s)$ merupakan parameter yang menunjukkan kinerja suatu sistem dan memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik tanggap kendali. Sensitivitas suatu sistem menunjukkan karakteristik respon terhadap peredaman gangguan yang ada didalam sistem tersebut sedangkan sensitivitas komplementer menunjukkan kecepatan tanggapan terhadap sinyal kendali, sifat peredaman *noise* sistem dan kualitas stabilitas sistem terhadap ketidakpastian (*uncertainty*).⁽¹⁶⁾

Jika sistem dinamik dinyatakan sebagai $G(s)$ dan sistem kendali dinyatakan sebagai $F(s)$ maka sistem lingkaran tertutup (*close loop system*) dapat dinyatakan dalam bentuk blok diagram pada Gambar 2.13. berikut.



Gambar 2.13 Diagram Blok Loop Shaping

Berdasarkan gambar 2.13 dapat diturunkan fungsi alih sensitivitas $S(s)$ dan fungsi alih sensitivitas komplementer $T(s)$ pada persamaan (2.56) dan (2.57) berikut.

$$S(s) = \frac{1}{1+G(s)K(s)} \quad (2.56)$$

$$T(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \quad (2.57)$$

Hubungan antara sensitivitas $S(s)$ dan sensitivitas komplementer $T(s)$ dinyatakan dalam persamaan (2.58) berikut.

$$S(s) + T(s) \leq \frac{1}{\gamma} \quad (2.58)$$

2.10.2 Pendekatan Mixed-Sensitivity

Dalam perancangan dengan pendekatan *mixed-sensitivity*, karakteristik sistem dapat ditentukan dengan menentukan batas spesifikasi antara fungsi sensitivitas $S(s)$ dan fungsi sensitivitas komplementer $T(s)$. Hal ini dapat dilakukan dengan menambah kompensator dalam sistem untuk membentuk fungsi $S(s)$ dan $T(s)$. Prosedur ini disebut dengan *loop shaping*. Dalam gambar 2.13 terlihat bahwa $W_1(s)$ diletakkan di keluaran sistem yang berkaitan dengan masukan $e(s)$ yang berkaitan dengan masukan $u(s)$ dan Blok $W_3(s)$ diletakkan pada keluaran $y(t)$ yang merupakan representasi fungsi sensitivitas komplementer $T(s)$.⁽¹²⁾

Dalam perancangan pengendali dengan metoda H_∞ Optimal dengan pendekatan *Mixed Sensitivity*, fungsi bobot $W_1(s)$ dan $W_3(s)$ digunakan untuk membatasi fungsi sensitivitas $S(s)$ dan $T(s)$. Hubungan antara fungsi bobot $W_1(s)$ dan $S(s)$ serta $W_3(s)$ dan sensitivitas $S(s)$ dan $T(s)$.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Sistem Secara Umum

Pada tugas akhir ini, sistem yang dianalisa merupakan perbandingan dari sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada generator sinkron tanpa pengendali H~ Optimal, sistem dengan menggunakan pengendali H~ Optimal, dan sistem dengan penambahan stabilizer. Input yang digunakan pada sistem ini adalah tegangan yang mana akan distabilkan dengan menggunakan pengendali atau stabilizer hingga mencapai spesifikasi yang diinginkan. Tugas akhir ini akan dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan software MATLAB.

3.2 Parameter Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)

Adapun parameter dan nilai yang digunakan pada sistem Automatic Voltage Regulator di generator sinkron ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Parameter Sistem Automatic Voltage Regulator(AVR)

Parameter	Nilai
Ka	10.0000
Ta	0.1000
Ke	1.0000
Te	0.4000
Kg	1.0000
Tg	1.0000
Kr	1.0000
Tr	0.0500

Nilai dari parameter pada Tabel 3.1 di atas akan dijadikan acuan untuk melakukan simulasi sistem. Sedangkan sistem dengan penambahan stabilizer memiliki nilai parameter seperti yang terlihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Parameter Sistem Automatic Voltage Regulator(AVR) dengan Penambahan Stabilizer

Parameter	Nilai
Ka	10.0000
Ta	0.1000
Ke	1.0000
Te	0.4000
Kg	1.0000
Tg	1.0000
Kr	1.0000
Tr	0.0500
Kf	1.0000
Tf	0.0100

Berdasarkan Tabel 3.2, dapat dilihat bahwa nilai yang digunakan sama dengan yang ada pada sistem *Automatic Voltage Regulator* yang biasa, hanya saja ada tambahan nilai Kf dan Tf sebagai konstanta dari stabilizer itu sendiri.

3.3 Langkah-langkah Penelitian

Adapun langkah dalam penelitian ini adalah

a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami tentang perancangan, pemodelan, analisa sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan

pengendali H_{∞} optimal. Bahan literatur didapat dari berbagai macam sumber seperti buku-buku, jurnal, dan website internet yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

b. **Pemodelan Matematis**

Pada tahap ini dilakukan pemodelan matematis untuk sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Hasil pemodelan yang diperoleh berupa fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup.

c. **Perancangan Sistem Kendali**

Pada tahap ini dilakukan perancangan pengendali dengan metoda H_{∞} Optimal.

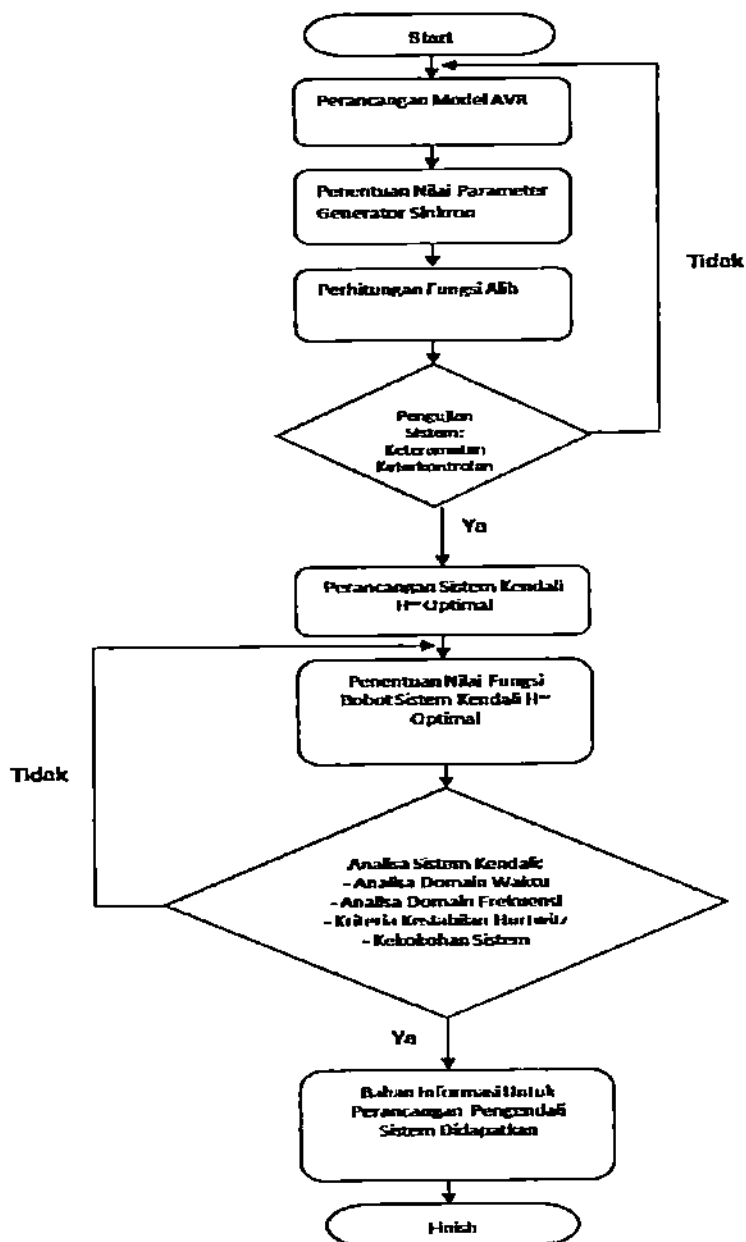
d. **Analisa Sistem Kendali**

Pada tahap ini dilakukan analisa performansi sistem kendali dalam domain waktu, domain frekuensi, analisa kestabilan, dan analisa kekokohan sistem terhadap gangguan.

e. **Penyusunan Laporan**

Pada tahap ini dilakukan penyusunan laporan tugas akhir

3.4. Diagram Alir



3.5. Jadwal Penelitian

Adapun jadwal penelitian dari tugas akhir ini diperlihatkan pada Tabel 3.3.

berikut:

Tabel 2. Waktu Pelaksanaan Tugas Akhir

No	Kegiatan	Waktu Pelaksanaan (bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi literatur						
2	Pemodelan matematis						
3	Perancangan sistem kendali						
4	Analisa sistem kendali						
5	Penyusunan laporan						

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

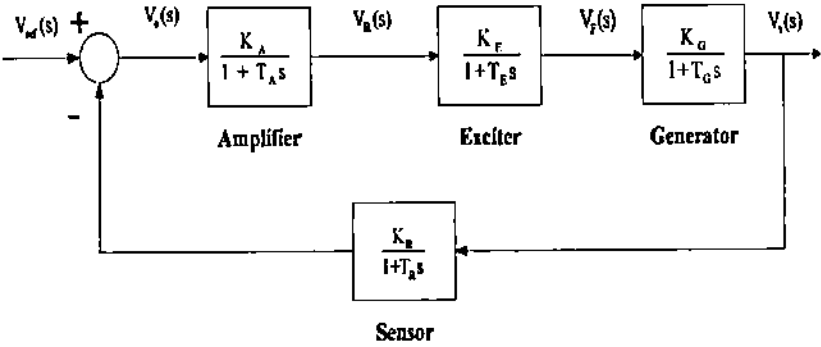
Terdapat banyak cara untuk mengendalikan dan merancang sebuah *Automatic Voltage Regulator* (AVR), yang mana salah satunya adalah dengan metoda H_{∞} optimal, dimana metoda ini diharapkan dapat menghasilkan perancangan pengendali yang kokoh terhadap gangguan, mampu meredam *noise* pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Pada bagian ini akan dilakukan analisa dan pembahasan hasil rancangan dan simulasi *Automatic Voltage Regulator* dengan menggunakan metoda H_{∞} Optimal. Simulasi yang digunakan dalam perancangan tugas akhir ini dengan menggunakan software MATLAB 2010.

Pada tugas akhir ini digunakan dua model *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yaitu AVR tanpa stabilizer dan AVR dengan menggunakan stabilizer. Analisa yang dilakukan meliputi analisa dalam domain waktu dan analisa dalam domain frekuensi untuk respon sistem lingkaran terbuka dan sistem lingkaran tertutup.

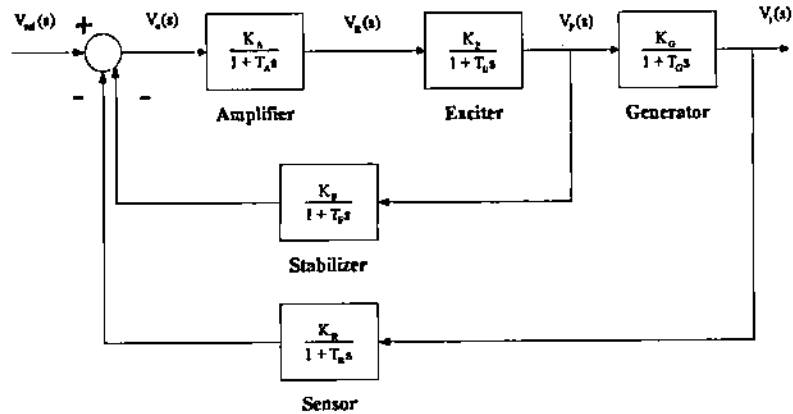
Untuk analisa kestabilan dalam domain waktu menggunakan kriteria Hurwitz dan dalam domain frekuensi menggunakan kriteria Nyquist. Sedangkan untuk analisa kekokohan menggunakan kriteria nilai puncak maksimum sensitifitas dan nilai puncak maksimum sensitifitas komplementer.

Untuk perancangan sistem AVR ini dilakukan dengan tiga cara yaitu (1) sistem tanpa pengendali H~ Optimal, (2) sistem dengan menggunakan pengendali H~ Optimal, dan (3) sistem dengan penambahan stabilizer. Hasil simulasi dengan menggunakan MATLAB tersebutnantinya akan dianalisa perbandingan dari ketiga sistem tersebut.

Adapun diagram blok dari sistem Automatic Voltage Regulator tanpa pengendali H~ Optimal dan setelah menggunakan penambahan stabilizer dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.1 Model Sistem Automatic Voltage Regulator Tanpa Pengendali



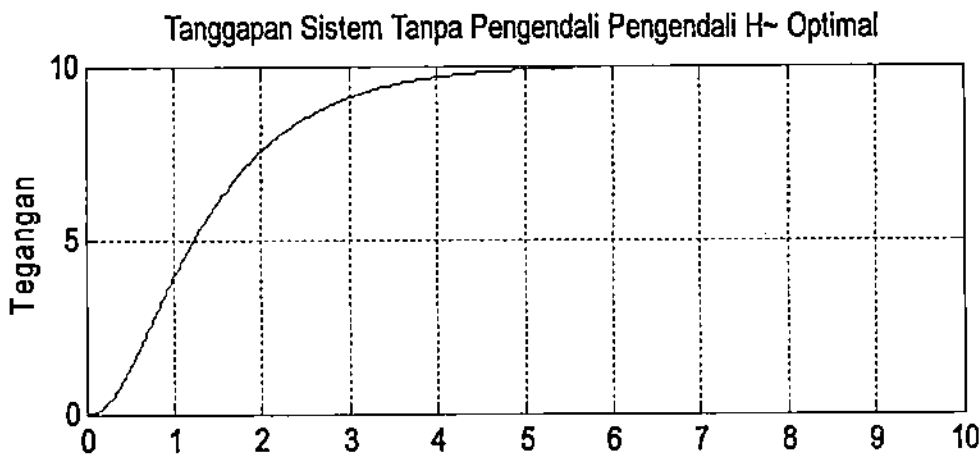
Gambar 4.2 Model Sistem Automatic Voltage Regulator dengan stabilizer

4.2 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu tanpa Metoda H~ Optimal

Untuk perancangan sistem lingkaran terbuka pada *Automatic Voltage Regulator* ini didapatkan fungsi transfer sistem lingkaran terbuka tanpa pengendali H~ Optimal pada persamaan 4.1 berikut:

$$\frac{10}{0.04s^3 + 0.54s^2 + 1.5s + 1} \quad (4.1)$$

Tipe sistem yang digunakan pada perancangan ini adalah sistem tipe 0. Pada bagian ini, hasil dari perancangan akan dianalisa dalam domain waktu. Dari hasil simulasi ini, sistem memiliki tanggapan respon sistem seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Tanggapan Peralihan sistem lingkaran terbuka tanpa metode H~ Optimal

Performansi sistem lingkaran terbuka dalam domain waktu dari sistem *Automatic Voltage Regulator* memiliki nilai kriteria yang diukur yaitu konstanta kesalahan yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Konstanta Kesalahan Sistem *Automatic Voltage Regulator* Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal

Kriteria	Nilai
Kesalahan Posisi (K_p)	10.000
Kesalahan Percepatan (K_v)	0
Kesalahan Percepatan (K_a)	0

Untuk nilai dari kesalahan keadaan mantap ketika diberi masukan undak, laju, dan parabolic, hasil yang didapatkan dari simulasi ini terlihat pada Tabel 4.2.

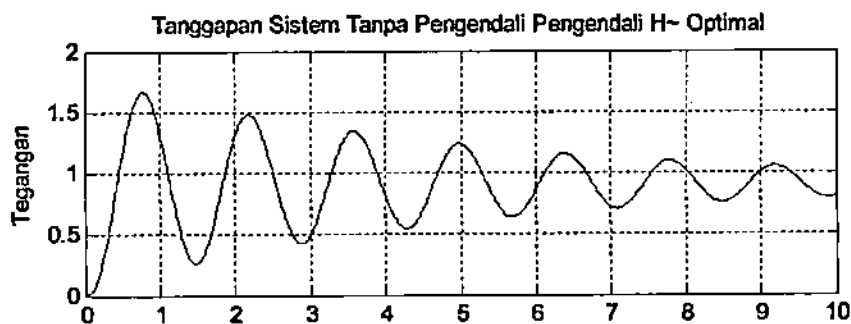
Tabel 4.2 Konstanta Kesalahan Keadaan Mantap *Automatic Voltage Regulator* Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal

Kriteria	Nilai
Masukan Laju	0.0909
Masukan Undak	∞
Masukan Parabolik	∞

4.3 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu tanpa Metode H_{∞} Optimal

Tanggapan sistem lingkaran tertutup pada *Automatic Voltage Regulator* jika tanpa menggunakan pengendali H_{∞} optimal ditunjukkan pada Gambar 4.4. Fungsi transfer yang didapat dari simulasi sistem lingkaran tertutup ini adalah

$$\frac{0.5s + 10}{0.002s^4 + 0.067s^3 + 0.615s^2 + 1.55s + 11}$$



Gambar 4.4Tanggapan Sistem Lingkak Tertutup tanpa Pengendali H ∞ Optimal

Dari respon tersebut terlihat bahwa sistem tidak stabil dikarenakan terdapat banyak noise pada keluaran sistem *Automatic Voltage Regulator* tanpa pengendali H ∞ Optimal ini. Hal tersebut memperlihatkan bahwa sistem tersebut memerlukan pengendali untuk mencapai stabil.

Kriteria	Nilai
<i>Rise Time</i> (T_r)	0.2534
<i>Settling Time</i> (T_s)	19.0812
<i>Maximum Overshoot</i>	82.7892%
Waktu Puncak	0.7686
Nilai Puncak	1.6617

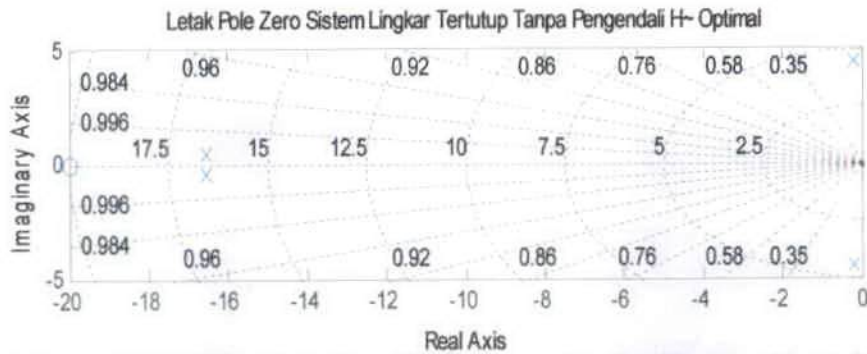
Performansi sistem lingkak tertutup dalam domain waktu dari sistem ini didapatkan hasil yaitu waktu naik yang diperlukan sistem adalah sebesar 0.2534 detik, yang mana waktu naik (*rise time*) T_r inimerupakan waktu yang diperlukan sistem agar respon sistem yang awalnya dari 10%, 5%, atau 0% naik menjadi 90%, 95%, dan 100%. Waktu respon yang diperlukan sistem untuk mencapai dan menetap

dalam daerah disekitar harga akhir, yang biasa disebut dengan *settling time* (T_s), adalah sebesar 19.0812 detik. Nilai dari T_s ini memiliki ukuran yang ditentukan dengan presentase mutlak dari harga tersebut biasanya 5% atau 2%. Lewatan maksimum (*maximum overshoot*) paling tinggi yang dapat dilakukan oleh sistem, dimana nilai tersebut diukur dari satu, adalah sebesar 82.7892%. Nilai puncak dari dari tanggapan sistem adalah 1.6617, yang mana sistem memerlukan waktu 0.7686 detik untuk tanggapan mencapai puncak lewatan pertama kali (T_p).

4.4 Analisa Kestabilan Sistem tanpa Metoda H~Optimal dalam Domain Waktu

Dari simulasi yang dilakukan, pada sistem lingkaran tertutup *Automatic Voltage Regulator* tanpa pengendali H~ Optimal ini didapatkan nilai akar-akar persamaan karakteristik, faktor redaman (ζ), dan frekuensi alamiah tak teredam atau frekuensi natural (ω_n). Nilai akar-akar persamaan karakteristiknya adalah $s_1 = -0.2020 + 4.48i$, $s_2 = -0.2020 - 4.48i$, $s_3 = -16.5 + 0.468i$, dan $s_4 = -16.6 - 0.468i$. Nilai faktor redaman dari sistem ini sebesar 0.0451 untuk akar-akar s_1 dan s_2 , dan 1.000 untuk akar-akar s_3 dan s_4 . Untuk nilai frekuensi alamiah tak teredam, pada akar-akar s_1 dan s_2 didapatkan nilai sebesar 4.48 rad/s dan 16.6 rad/s pada akar-akar s_3 dan s_4 .

Pada sistem lingkaran tertutup tanpa pengendali H~ Optimal ini dapat diketahui tempat kedudukan pole-zero yang terlihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Tempat Kedudukan Pole-Zero DARI Sistem Lingkak Tertutup Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal

Untuk mengetahui sistem stabil atau tidak, perlu dilakukan analisa kestabilan sistem dengan cara tertentu. Pada tugas akhir ini, kestabilan sistem dianalisa melalui kriteria kestabilan *Hurwitz*. Dengan menganalisa kestabilan menggunakan kriteria *Hurwitz* ini, akan diberikan informasi sistem tersebut stabil atau tidak dengan menunjukkan apakah nilai determinan bernilai positif atau negatif. Jika nilai determinan tersebut bernilai positif, maka sistem dapat dikatakan telah stabil.

Berdasarkan fungsi alih lingkak tertutup pada persamaan (4.2), didapatkan persamaan polinomial yang dapat dilihat pada persamaan (4.3) berikut:

$$0.002s^4 + 0.067s^3 + 0.615s^2 + 1.55s + 11 = 0 \quad (4.3)$$

Dengan menggunakan kriteria *Hurwitz*, didapatkan nilai determinan dari persamaan (4.3) di atas.

$$\begin{aligned} \Delta_4 &= \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 0.067 & 1.55 & 0 & 0 \\ 0.002 & 0.615 & 11 & 0 \\ 0 & 0.002 & 1.55 & 0 \\ 0 & 0.002 & 0.615 & 11 \end{vmatrix} = 0.1065 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.067 & 1.550 & 0 \\ 0.002 & 0.615 & 11 \\ 0.000 & 0.067 & 1.55 \end{vmatrix} = 0.0097 \quad (4.5)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.067 & 1.55 \\ 0.002 & 0.615 \end{vmatrix} = 0.0381 \quad (4.6)$$

$$\Delta_1 = a_3 = 0.067 \quad (4.7)$$

Adapun batas kestabilan yang didapatkan dari hasil simulasi ini terdapat pada persamaan (4.8) berikut.

$$0.06700.03810.00970.1065 \quad (4.8)$$

Berdasarkan persamaan (4.8) di atas, dapat dilihat bahwa batas kestabilan bernilai positif. Dengan demikian, sistem AVR dalam domain waktu telah stabil menurut kriteria Hurwitz.

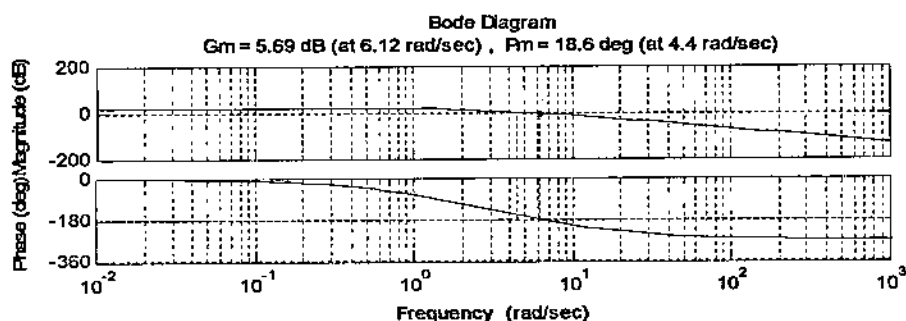
4.5 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi Tanpa Metoda H_∞ Optimal

Setelah dilakukan analisa dalam domain waktu terhadap sistem lingkaran terbuka Automatic Voltage Regulator ini, didapatkan nilai dari beberapa kriteria yaitu margin penguatan, frekuensi dari margin penguatan, margin fasa, dan frekuensi dari margin fasa. Nilai dari kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3. berikut.

Tabel 4.3 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka Untuk Domain Frekuensi Tanpa Metoda H_∞

Kriteria	Nilai
Margin Penguatan	1.9250
Frekuensi Margin Penguatan	6.1238
Margin Fasa	18.5936
Frekuensi Margin Fasa	25.3356

Menurut studi literatur yang telah dilakukan, sebuah sistem bisa dikatakan stabil jika memiliki margin penguatan di atas 6 dB. Tetapi nilai kriteria yang didapat dari simulasi tersebut ada sebesar 1.9250, yang berarti sistem lingkaran terbuka pada *Automatic Voltage Regulator* ini tidak memenuhi syarat kriteria kestabilan. Untuk respon frekuensi yang diberikan oleh sistem ini ditunjukkan pada diagram bode seperti Gambar 4.4 berikut ini:



Gambar 4.6 Diagram Bode Sistem Lingkaran Terbuka *Automatic Voltage Regulator* tanpa Pengendali H_{∞} Optimal

Berdasarkan Gambar 4.6 dan nilai kriteria pada Tabel 4.3, semuanya bernilai positif, baik margin penguatan ataupun margin fasanya. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa sistem sudah bisa dikatakan stabil tetapi belum memenuhi kriteria kestabilan yang diinginkan.

4.6 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi Tanpa

Metoda H_{∞} Optimal

Untuk analisa dalam domain frekuensi pada sistem lingkaran tertutup, kriteria sistem yang diukur biasanya adalah lebar pita (*bandwidth*) yang berkaitan dengan kecepatan respon sistem menanggapi sinyal masukan dan menunjukkan sifat dari tanggapan peralihan yang berkaitan dengan kecepatan waktu naik, magnitude puncak

menunjukkan sifat dari tanggapan peralihan yang berkaitan dengan redaman sistem dan lewatan maksimum, dan frekuensi puncak maksimum yang berkaitan dengan kecepatan tanggapan peralihan. Frekuensi puncak maksimum tersebut terbagi atas dua yaitu puncak maksimum sensitivitas dan puncak maksimum sensitivitas komplementer.

Pada simulasi ini, nilai kriteria yang diukur adalah lebar pita, puncak maksimum sensitivitas, dan puncak maksimum sensitivitas komplementer, yang dimana performansi sistem lingkaran tertutup ini ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Performansi Sistem Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi Automatic Voltage Regulator Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal

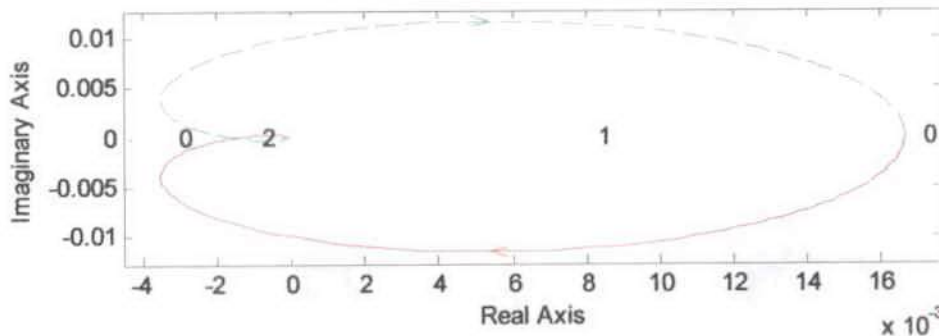
Kriteria	Nilai
Lebar Pita (<i>Bandwidth</i>)	0.975 rad/s
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	9.9795
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	9.6315

Dapat dilihat pada Tabel 4.4 di atas, lebar pita(*bandwidth*) yang dihasilkan sangat kecil, yaitu senilai 0.975 rad/s sehingga akan mengakibatkan waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai kestabilan akan menjadi semakin lama, dan waktu naik dan waktu keadaan mantap dari tanggapan waktu sistem lingkaran tertutup akan lambat.

4.7 Analisa Kestabilan Sistem Tanpa Metoda H_{∞} Dalam Domain Frekuensi

Analisis kestabilan sistem dalam domain frekuensi menggunakan kriteria nyquist yang dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari hasil simulasi, didapatkan batas

kestabilan sistem dalam domain frekuensi sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah dalam range $-0.1 < k < 1.925$.

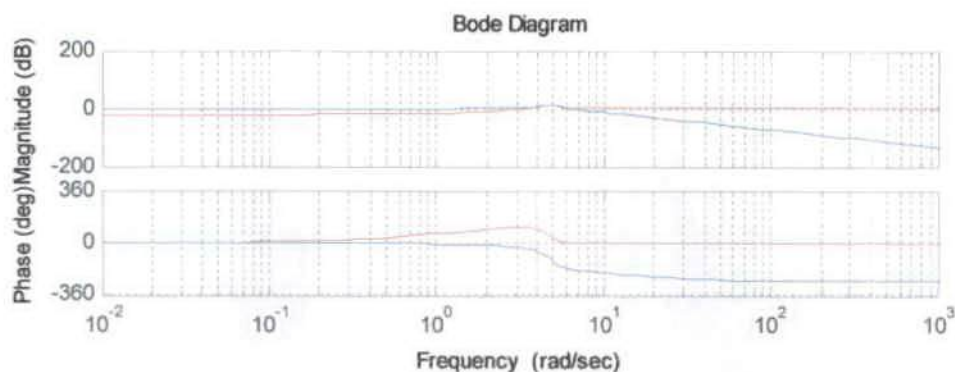


Gambar 4.7 Diagram Nyquist Sistem Lingkaran Tertutup tanpa Metoda H_∞ Optimal

Darri Gambar 4.7. di atas, dapat dilihat bahwa diagram Nyquist tidak melewati $(-1, j0)$, maka sistem dapat dikatakan stabil dalam domain frekuensi.⁽¹⁵⁾

4.8 Analisa Kekokohan Tanpa Metoda H_∞ Optimal

Untuk analisa kekokohan sistem *Automatic Voltage Regulator* ini, sistem dianalisa menggunakan kriteria puncak maksimum sensitifitas dan nilai puncak maksimum sensitifitas komplementer. Sistem tersebut bisa dikatakan kokoh (*robust*) terhadap gangguan jika memilikinilai puncak maksimum sensitivitas (*sensitivity*) (M_s) kecil dari 2 dan nilai puncak maksimum sensitifitas komplementer kurang dari 1.25. Dari hasil simulasi yang dilakukan, diperoleh nilai M_s sebesar 9.9795, yang mana nilai ini sangat jauh dari syarat kekokohan suatu sistem. Maka dari itu, sistem ini diperlukan pengendali agar syarat kekokohan dapat terpenuhi. Diagram bode untuk sistem *Automatic Voltage Regulator* tanpa menggunakan pengendali ini dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Diagram Bode Sistem AVR tanpa Pengendali H~ Optimal

4.9 Kriteria Perancangan Sistem Kendali dengan Metoda H~ Optimal

Dalam perancangan sistem dengan menggunakan pengendali H~ Optimal, ada beberapa kriteria yang harus terpenuhi. Kriteria tersebut harus terpenuhi agar sistem dapat dikatakan stabil. Saat melakukan simulasi, dapat dilakukan cara dengan mengubah bobot w_1 , w_2 , dan w_3 hingga mendapatkan spesifikasi atau kriteria yang diinginkan.

Untuk performansi sistem dalam domain waktu adalah :

1. Waktu keadaan mantap (*settling time*) (T_s) kurang dari 1 detik
2. Waktu naik (*rise time*) (T_r) kurang 0.500 detik
3. Kesalahan keadaan mantap kurang dari 0.25 detik

Untuk performansi sistem dalam domain frekuensi adalah :

1. Gain margin besar dari 6 dB
2. Sistem bersifat kokoh (*robust*) terhadap gangguan yang ditunjukkan dengan besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas (*sensitivity*) (M_s) kecil dari 2.
3. Sistem mempunyai kemampuan untuk meredam derau (*noise*) pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukanyang ditunjukkan dengan

besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer (*complementary sensitivity*) (M_T) kecil dari 1.25.

4.10 Performansi Sistem Lingkar Terbuka dalam Domain Waktu dengan Metoda H~ Optimal

Pada analisa bagian sistem lingkak terbuka dengan pengendali ini, kriteria yang digunakan adalah konstanta kesalahan dan kesalahan keadaan mantap.

Persamaan sistem lingkak terbuka ini dapat dilihat pada persamaan (4.9) berikut:

$$\frac{-1.819 \times 10^{-12}s^8 - 2.328 \times 10^{-10}s^7 + 1.118 \times 10^{-8}s^6 + 3.067 \times 10^8s^5 + 7.207 \times 10^9s^4 + 6.057 \times 10^{10}s^3 + 2.262 \times 10^{11}s^2 + 3.642 \times 10^{11}s + 1.917 \times 10^{11}}{s^9 + 2539s^8 + .809 \times 10^5s^7 + 3.276 \times 10^7s^6 + 5.922 \times 10^8s^5 + 4.743 \times 10^9s^4 + 1.879 \times 10^{10}s^3 + 3.683 \times 10^{10}s^2 + 3.307 \times 10^{10}s + 1.083 \times 10^{10}} \tag{4.9}$$

Nilai dari kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6. Tipe sistem yang digunakan adalah sistem tipe 0.

Tabel 4.5 Konstanta Kesalahan Sistem *Automatic Voltage Regulator* Dengan Pengendali H ∞ Optimal

Kriteria	Nilai
Konstanta Kesalahan Posisi	17.6909
Konstanta Kesalahan Kecepatan	0
Konstanta Kesalahan Percepatan	0

Tabel 4 6 Konstanta Kesalahan Keadaan Mantap Sistem *Automatic Voltage Regulator* Dengan Pengendali H ∞ Optimal

Kriteria	Nilai
Masukan Laju	0.0535
Masukan Undak	∞
Masukan Parabolik	∞

Respon sistem pada sistem lingkak terbuka dengan menggunakan pengendali H~ Optimal ini diperlihatkan pada Gambar 4.9berikut:ini:



Gambar 4.9 Tanggapan Peralihan Sistem Lingkaran Terbuka dengan Metode H~ Optimal

Dari Gambar 4.9 di atas jika dibandingkan dengan Gambar 4.1 yang tidak menggunakan pengendali sebelumnya, sistem *Automatic Voltage Regulator* menggunakan pengendali H~ Optimal ini memiliki respon yang cepat. Sistem ini tidak membutuhkan waktu yang lama, yaitu sekitar 3.5 detik untuk mencapai tegangan yang stabil.

4.11 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu dengan Metoda H~ Optimal

Performansi lingkaran tertutup dalam domain waktu Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan metoda H~ Optimal ini dilakukan dengan mengacu kepada spesifikasi perancangan. Persamaan fungsi alih dari sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu ini dapat dilihat pada persamaan (4.10) berikut.

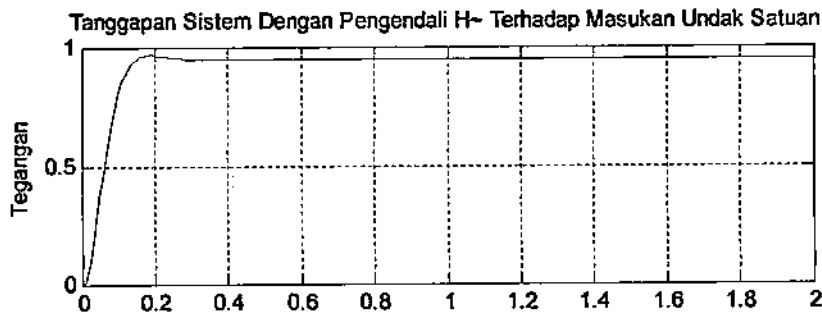
$$\frac{-4.657 \times 10^{-10} s^7 + 1.118 \times 10^{-8} s^6 + 3.067 \times 10^8 s^5 + 7.207 \times 10^9 s^4 + 6.057 \times 10^{10} s^3 + 2.262 \times 10^{11} s^2 + 3.642 \times 10^{11} s + 1.917 \times 10^{11}}{s^9 + 2539 s^8 + 5.809 \times 10^5 s^7 + 3.276 \times 10^7 s^6 + 8.988 \times 10^8 s^5 + 1.195 \times 10^{10} s^4 + 7.93 \times 10^{10} s^3 + 2.63 \times 10^{11} s^2 + 3.972 \times 10^{11} s + 2.025 \times 10^{11}} \quad (4.10)$$

Untuk kriteria performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu pada sistem *Automatic voltage regulator* (AVR) dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Performansi Sistem Lingkari Tertutup dalam Domain Waktu dengan Metoda H~ Optimal

Kriteria	Nilai
Waktu Naik (T_r)	0.0866
Waktu Settling (T_s)	0.1354
Settling Maksimum	0.9651
Settling Minimum	0.8520
Persen Overshoot (M_p)	1.9689
Persen Undershoot	0.0000
Peak	0.9651
Waktu Peak (T_p)	0.1869

Untuk respons sistem dengan masukan fungsi undak-satuan pada *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan menggunakan metoda H~ Optimal ditampilkan pada Gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.10 Tanggapan Peralihan Sistem Lingkari Tertutup dengan Metode H~ Optimal

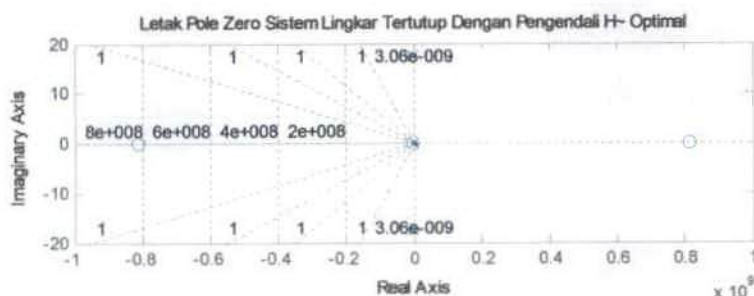
Jika respon pada Gambar 4.9 di atas dibandingkan dengan sistem tanpa menggunakan pengendali H~ optimal pada Gambar 4.2, sistem yang menggunakan pengendali ini memiliki respon yang lebih mulus dan hanya membutuhkan sedikit waktu untuk mencapai stabil. Hal tersebut juga dapat dilihat pada nilai T_r yang menjadi semakin cepat, dari 0.2534 menjadi 0.0866.

Adapun nilai akar-akar, faktor redaman, dan nilai frekuensi alamiah tak teredam dari persamaan (4.7) di atas dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 Akar-akar Persamaan Karakteristik Lingkaran Tertutup Sistem Kendali *Automatic Voltage Regulator* dengan pengendali H_{∞} Optimal

Kriteria	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Akar-akar persamaan	-1.00	-2.50	-5.00	-5.00	-10.00	-21.9+17.5i	-21.9-17.5i	-180.00	-2290.00
Faktor Redaman (ζ)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.781	0.781	1.00	1.00
Frekuensi Alamiah Tak Teredam (ω_n)	1.00	2.50	5.00	5.00	10.00	28.00	28.00	180.00	2290.00

Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan letak-letak pole dan zero yang dapat dilihat pada diagram tempat kedudukan akar yang bisa dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Tempat kedudukan pole-zero dari sistem lingkaran tertutup dengan pengendali H_{∞} Optimal

4.12 Analisa Kestabilan Sistem Dengan Metoda H_{∞} Optimal Dalam Domain Waktu

Analisa kestabilan yang dilakukan pada rancangan ini menggunakan analisa kriteria Hurwitz, dimana persamaannya ditunjukkan pada persamaan 4.11 berikut:

$$\frac{-4.657 \times 10^{-10}s^7 + 1.118 \times 10^{-8}s^6 + 3.067 \times 10^8s^5 + 7.207 \times 10^9s^4 + 6.057 \times 10^{10}s^3 + 2.262 \times 10^{11}s^2 + 3.642 \times 10^{11}s + 1.917 \times 10^{11}}{s^9 + 2539s^8 + 5.809 \times 10^5s^7 + 3.276 \times 10^7s^6 + 8.988 \times 10^8s^5 + 1.195 \times 10^{10}s^4 + 7.93 \times 10^{10}s^3 + 2.63 \times 10^{11}s^2 + 3.972 \times 10^{11}s + 2.025 \times 10^{11}} \quad (4.11)$$

Pada Tabel 4.8. dapat dilihat bahwa akar-akar persamaan bernilai real negatif, sehingga sistem dapat dikatakan telah stabil. Dari hasil simulasi yang dilakukan, didapatkan persamaan matriks yang terdapat pada persamaan 4.12. Persamaan matrik tersebut dihasilkan dari persamaan 4.11 sebelumnya.

$$\begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.5198 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

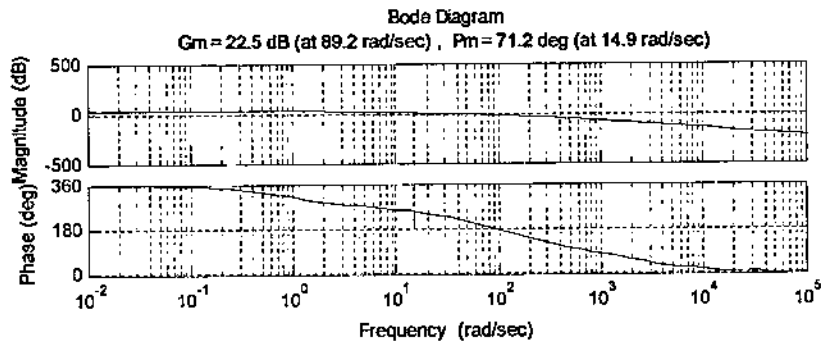
System is stable (4.12)

Dari persamaan matrik (4.12) di atas terlihat bahwa batas-batas kestabilan dengan menggunakan kriteria Hurwitz memiliki batas-batas yang bernilai positif sehingga diperoleh sistem yang memenuhi kriteria kestabilan Hurwitz.

Pada simulasi kestabilan dalam domain waktu dengan menggunakan pengendali H_{∞} optimal ini, sistem bersifat stabil dengan batas nilai kestabilan sebesar 1.0×10^{80} .

4.13 Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Frekuensi Dengan Metoda H_{∞} Optimal

Untuk performansi sistem lingkar terbuka dalam domain frekuensi, kriteria yang didapatkan dari hasil simulasi adalah margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa, dan frekuensi margin fasa. Kriteria tersebut didapatkan dari Gambar 4.10. yang ditampilkan dalam diagram bode di bawah.



Gambar 4.12 Diagram Bode Sistem dengan Pengendali H_∞ Optimal

Nilai kriteria performansi sistem lingkaran terbuka dalam domain frekuensi ini ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut, dimana nilai tersebut didapatkan dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

Tabel 4.9 Performansi sistem lingkaran terbuka dalam domain frekuensi dengan metoda H_∞ Optimal

Kriteria	Nilai
Margin penguat	13.2633
Frekuensi margin penguat	89.1742
Fasa Margin	71.1629
Frekuensi fasa margin	14.9279

4.14 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi Dengan Metoda H_∞ Optimal

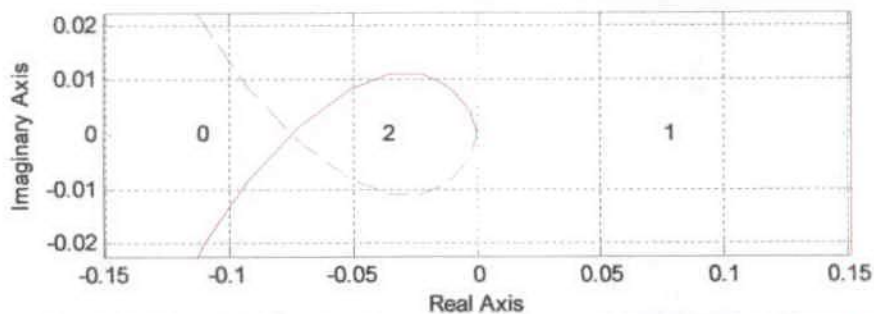
Kriteria performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi yang didapatkan pada simulasi ini adalah lebar pita sebesar 24.7 rad/detik. Sebelum digunakannya pengendali H_∞ Optimal, nilai dari lebar pita adalah sebesar 0.975. Dengan bertambahnya lebar pita (*bandwidth*) pada sistem AVR ini dari sebelum digunakannya pengendali dengan menggunakan pengendali, mengakibatkan lebih

cepatnya waktu naik (T_r) dan waktu keadaan mantap (T_s) dari tanggapan waktu sistem lingkaran tertutup.

4.15 Analisa Kestabilan Sistem Dengan Metoda H_∞ Optimal Dalam Domain Frekuensi

Untuk analisa kestabilan dalam domain frekuensi, kriteria yang dianalisa adalah nilai dari margin penguatannya. Sistem bisa dikatakan stabil jika nilai margin penguatana tersebut lebih besar dari 6 dB. Dapat dilihat pada Tabel 4.7. margin penguatan adalah sebesar 13.2633. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem *Automatic Voltage Regulator* dengan pengendali H_∞ telah stabil dalam domain frekuensi.

Kestabilan sistem dengan metoda H_∞ optimal ini dianalisa dengan kriteria Nyquist yang dapat dilihat dari Gambar 4.11.



Gambar 4.13 Diagram Nyquist Sistem AVR dengan Pengendali H_∞ Optimal

Dalam analisa kriteria Nyquist, sistem akan dikatakan stabil jika plot diagram Nyquist tidak melingkupi titik $(-1, j0)$. Dari Gambar 4.11 diatas terlihat bahwa plot diagram Nyquist tidak melingkupi titik $(-1, j0)$, sehingga sistem dapat dikatakan bersifat stabil.

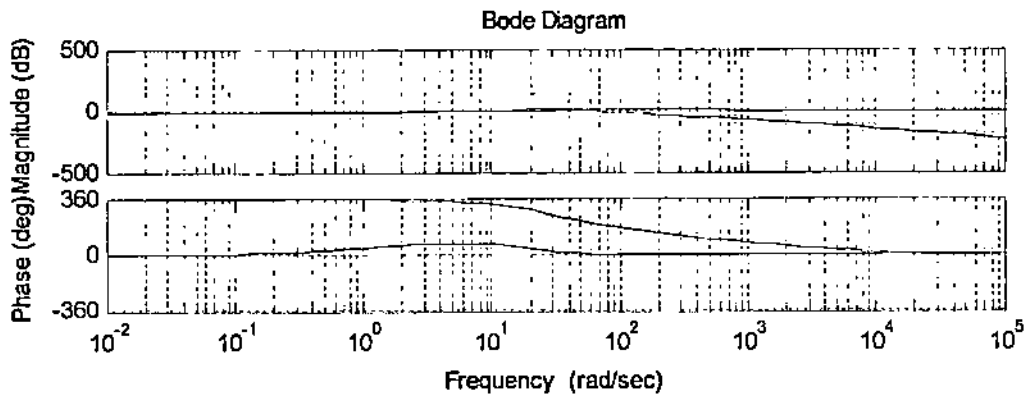
4.16 Analisa Kekokohan Dengan Metoda H~ Optimal

Dalam melakukan analisa kekokohan pada sistem AVR ini, kriteria yang digunakan adalah kriteria puncak maksimum sensitifitas dan puncak maksimum sensitifitas komplementer. Untuk memenuhi syarat kekokohan suatu sistem, nilai puncak maksimum sensitifitas (M_S) harus kurang dari 2 dan nilai puncak maksimum sensitifitas komplementer (M_T) kurang dari 1.25.

Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan nilai puncak maksimum sensitifitas sebesar 1.2797 dan nilai puncak maksimum sensitifitas komplementer sebesar 0.9465. Nilai tersebut bertambah kecil jika dibandingkan dengan sistem tanpa menggunakan pengendali H~ optimal. Jika nilai M_S dan M_T bertambah besar maka performansi sistem dalam domain frekuensi dan kekokohan sistem terhadap gangguan, peredaman derau pada frekuensi tinggi akan semakin jelek serta tanggapan terhadap masukan undak satuan akan semakin lama.

Dari nilai yang didapatkan pada simulasi tersebut, dapat dikatakan sistem dengan menggunakan pengendali H~ optimal telah memenuhi syarat kekokohan atau kokoh terhadap gangguan.

Diagram bode untuk sistem *Automatic Voltage Regulator* dengan menggunakan pengendali ini dapat dilihat pada Gambar 4.14. berikut.



Gambar 4.14 Diagram Bode Sistem AVR dengan Pengendali H~ Optimal

4.17 Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Waktu Dengan Penambahan Stabilizer

Penambahan *stabilizer* pada sistem *Automatic Voltage Regulator* ini diletakkan pada keluaran sistem *exciter* dan kemudian keluaran tersebut dijadikan umpan balik terhadap masukan sistem *amplifier*. Nilai parameter dari setiap komponen pada *Automatic Voltage Regulator* ini dapat dilihat pada Tabel 4.10. berikut.

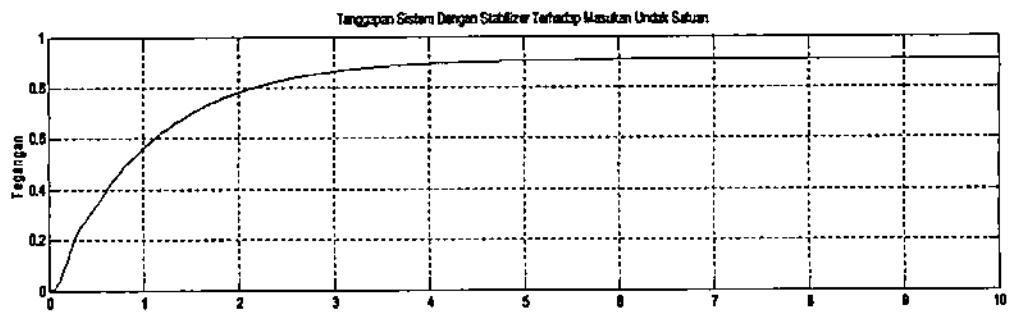
Tabel 4.10 Nilai Parameter *Automatic Voltage Regulator* dengan Penambahan *Stabilizer*

Parameter	Nilai
Ka	10.0000
Ta	0.1000
Ke	1.0000
Te	0.4000
Kg	1.0000
Tg	1.0000
Kr	1.0000
Tr	0.0500
Kf	1.0000
Tf	0.0100

Dari sistem AVR dengan penambahan stabilizer ini didapatkan fungsi alih untuk sistem lingkaran terbuka yang terdapat pada persamaan (4.13) berikut.

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.0454s^3 + 0.5550s^2 + 11.5100s + 11} \quad (4.13)$$

Untuk respons sistem lingkaran terbuka dengan penambahan *stabilizer* dapat dilihat pada Gambar 4.15. dibawah.



Gambar 4.15 Respon Sistem AVR dengan Stabilizer

Dari hasil simulasi, tipe sistem lingkaran terbuka adalah tipe 0 dengan kriteria yang didapatkan adalah konstanta kesalahan posisi (K_p), kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan, kesalahan keadaan mantap, dan kesalahan keadaan mantap untuk masukan parabolik. Nilai dari kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.11. berikut.

Tabel 4.11 Konstanta dan Kesalahan Keadaan Mantap Sistem *Automatic Voltage Regulator* dengan Stabilizer

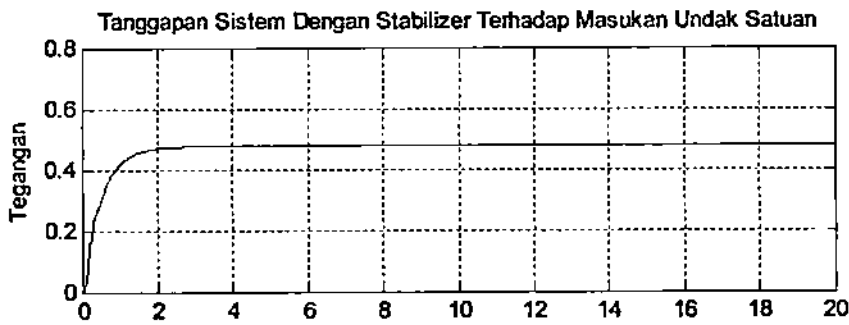
Kriteria	Nilai
Tipe Sistem	0
Konstanta Kesalahan Posisi (K_p)	0.9091
Konstanta Kesalahan Kecepatan (K_v)	0
Konstanta Kesalahan Percepatan (K_a)	0
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.5238
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju Satuan	Tak Hingga
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik	Tak Hingga

4.18 Performansi Sistem Lingkak Tertutup dalam Domain Waktu dengan Penambahan Stabilizer

Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan fungsi alih lingkak tertutup dengan penambahan *stabilizer* pada persamaan (4.14) berikut.

$$\frac{V_i}{V_{ref}} = \frac{0.005s^2 + 0.600s + 10}{2 \times 10^{-5}s^5 + 0.00267s^4 + 0.07315s^3 + 1.13100s^2 + 12.16000s + 21} \tag{4.14}$$

Respon sistem yang dihasilkan dari *Automatic Voltage Regulator* dengan penambahan *stabilizer* ini dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Tanggapan Sistem dengan Stabilizer

Dari respon sistem yang ada pada Gambar 4.14 di atas, dapat dilihat bahwa sistem tidak lagi berosilasi atau sistem dapat stabil lebih cepat dibandingkan sistem sebelumnya yang tanpa menggunakan *stabilizer*. Untuk nilai dari kriteria sistem lingkak tertutup dapat dilihat dari Tabel 4.12. berikut.

Tabel 4.12 Performansi Sistem Lingkak Tertutup AVR dengan Penambahan*Stabilizer*

Kriteria	Nilai
Waktu Naik (T_r)	1,0115
Waktu Settling (T_s)	1,9127
Settling Maksimum	0,4295
Settling Minimum	0,4761
Persen Overshoot	0,0000
Persen Undershoot	0,0000
Peak	0,4761
Waktu Peak (T_p)	4,3233

4.19 Analisa Kestabilan Sistem dengan Penambahan Stabilizer dalam Domain Waktu.

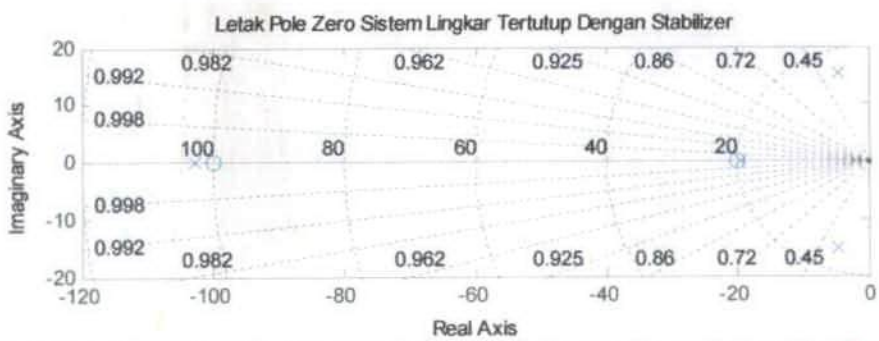
Untuk analisa kestabilan sistem dalam domain waktu, digunakan fungsi alih yang ada pada persamaan (4.12) untuk mendapatkan kriteria akar-akar persamaan karakteristik, faktor redaman, dan frekuensi alamiah tak teredam. Nilai dari kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.13. berikut.

Tabel 4.13 Akar-akar Persamaan Karakteristik Lingkar Tertutup Sistem Kendali *Automatic Voltage Regulator* dengan Penambahan *Stabilizer*

Kriteria	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
Akar-akar persamaan	-0.208	-4.65+15.21i	-4.65-15.21i	-19.4	-103.00
Faktor Redaman (ζ)	1.00	0.292	0.292	1.00	1.00
Frekuensi Alamiah Tak Teredam (ω_n)	2.08	15.9	15.9	19.4	103.00

Untuk analisa kestabilan sistem menggunakan akar-akar persamaan karakteristik, sistem akan dikatakan stabil jika akar-akar persamaannya bernilai negatif. Dari Tabel 4.13. di atas, akar-akar persamaannya bernilai negatif, yang manadapat dikatakan bahwa sistem dengan penambahan stabilizer telah memiliki output yang stabil.

Tempat pole dan zero dari sistem dengan penambahan stabilizer ini dapat dilihat pada Gambar 4.17. di bawah ini.



Gambar 4.17 Letak pole dan zero sistem AVR dengan Penambahan Stabilizer

Analisa kestabilan juga dilakukan dengan menggunakan kriteria Hurwitz. Hal ini dilakukan dengan pertama mengubah persamaan karakteristik (4.14) ke dalam bentuk polynomial seperti pada persamaan (4.15) berikut:

$$2 \times 10^{-5} s^5 + 0.00267 s^4 + 0.07315 s^3 + 1.131 s^2 + 12.16 s + 21 \quad (4.15)$$

Dari persamaan karakteristik (4.15), didapatkan nilai determinan yang dapat dilihat pada persamaan (4.16) s/d (4.20) berikut.

$$\Delta_1 = a_{n-1} = 0.0027 \quad (4.16)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.00267 & 1.131 \\ 2 \times 10^{-5} & 0.0731 \end{vmatrix} = 0.0002 \quad (4.17)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.00267 & 1.131 & 21 \\ 2 \times 10^{-5} & 0.0731 & 12.1 \\ 0 & 0.00267 & 1.131 \end{vmatrix} = 0.0001 \quad (4.18)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.00267 & 1.131 & 21 & 0 \\ 2 \times 10^{-5} & 0.0731 & 12.1 & 0 \\ 0 & 0.00267 & 1.131 & 21 \\ 0 & 2 \times 10^{-5} & 0.0731 & 12.1 \end{vmatrix} = 0.0011 \quad (4.19)$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & a_{n-9} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & a_{n-8} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} \\ 0 & 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.00267 & 1.131 & 21 & 0 & 0 \\ 2 \times 10^{-5} & 0.0731 & 12.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00267 & 1.131 & 21 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^{-5} & 0.0731 & 12.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00267 & 1.131 & 21 \end{vmatrix} = 0.0227 \quad (4.20)$$

Sedangkan berdasarkan hasil simulasi program, didapatkan nilai batas kestabilan yang dapat dilihat pada persamaan (4.21) berikut:

$$0.0027 \quad 0.0002 \quad 0.0001 \quad 0.0011 \quad 0.0227 \quad (4.21)$$

Sistem is stable

Berdasarkan kriteria Hurwitz, sistem ini sudah bisa dikatakan stabil karena memiliki nilai determinan yang bernilai positif. Begitu juga berdasarkan simulasi matlab, sistem dengan penambahan stabilizer ini bersifat stabil.

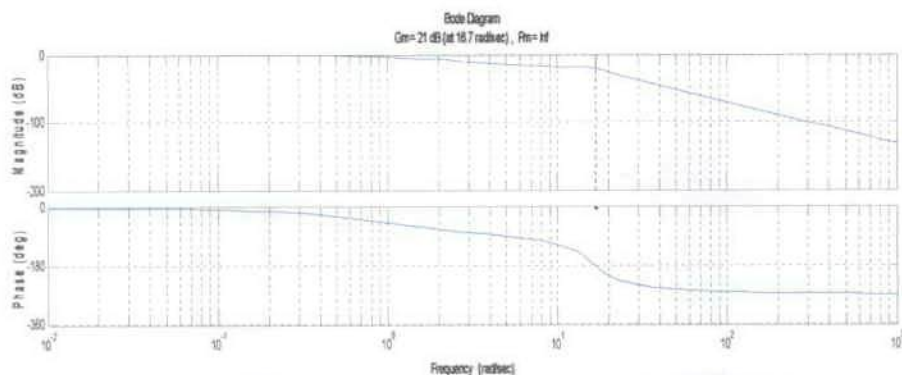
4.20 Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan Stabilizer.

Untuk analisa sistem lingkaran terbuka dalam domain frekuensi, kriteria yang didapatkan dari simulasi adalah margin penguat, frekuensi margin penguat, fasa margin, dan frekuensi fasa margin. Nilai dari kriteria performansi sistem lingkaran terbuka Automatic Voltage Regulator dalam domain frekuensi dengan penambahan stabilizer inidapat dilihat pada Tabel 4.14. berikut.

Tabel 4 14 Performansi Lingkaran Terbuka Automatic Voltage Regulator dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan Stabilizer

Kriteria	Nilai
Margin penguat	11.2476
Frekuensi margin penguat	16.6823
Fasa Margin	Tak Hingga

Performansi dari sebuah sistem dapat dikatakan bagus salah satunya jika sistem tersebut memiliki margin penguatan lebih besar dari 6 dB. Pada Tabel 4.14. di atas, dapat dilihat bahwa nilai dari margin penguat adalah sebesar 11.2476. Maka sistem dengan penambahan stabilizer ini telah dapat dikatakan bagus.



Gambar 4.18 Diagram Bode Lingkaran Terbuka dengan *Stabilizer*

Dari hasil simulasi, didapatkan margin penguat dan margin fasa diagram bode pada Gambar 4.18. bernilai positif, sehingga dapat dikatakan sistem bersifat stabil.

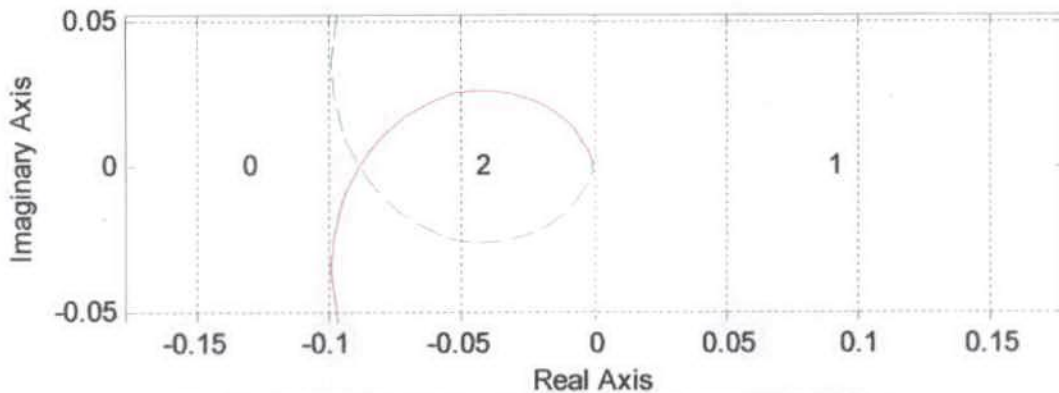
4.21 Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Frekuensi dengan Penambahan *Stabilizer*.

Kriteria dari performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi adalah lebar pita (*bandwidth*), nilai magnitude puncak, dan frekuensi puncak. Dari hasil simulasi yang dilakukan, nilai kriteria yang didapatkan adalah lebar pita (*bandwidth*) sebesar 2.23 rad/detik.

Jika dibandingkan dengan sistem AVR tanpa menggunakan *stabilizer* dan pengendali, nilai dari lebar pita ini bertambah. Hal ini mengakibatkan waktu naik (T_r) dan waktu keadaan mantap semakin cepat, sehingga sistem hanya membutuhkan sedikit waktu untuk mencapai tegangan yang stabil.

4.22 Analisa Kestabilan Sistem dalam Domain Frekuensi.

Untuk analisa kestabilan sistem dalam domain frekuensi menggunakan kriteria Nyquist. Sistem akan bersifat stabil jika plot diagram nyquist dari sistem tidak melingkupi titik koordinat $(-1, j0)$.



Gambar 4.19 Kriteria Nyquist Sistem AVR dengan *Stabilizer*

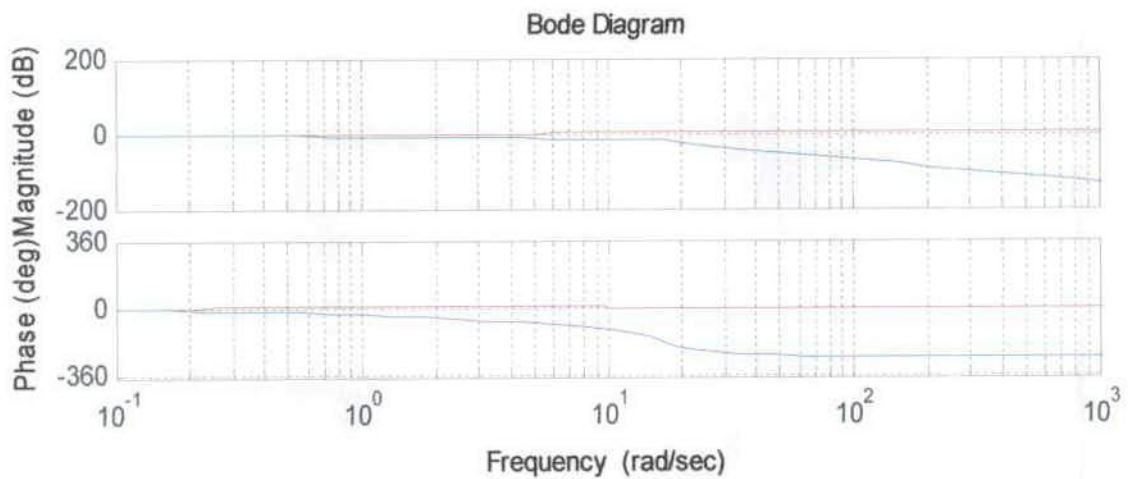
Berdasarkan hal tersebut dan kriteria nyquist untuk sistem menggunakan *stabilizer* pada Gambar 4.19, dapat dikatakan sistem bersifat stabil karena tidak melingkupi titik koordinat $(-1, j0)$.

4.23 Analisa Kekokohan Sistem.

Analisa kekokohan sistem menggunakan kriteria puncak maksimum yang terdiri dari nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Untuk sistem yang bersifat stabil nilai maksimum sensitivitas bernilai kurang dari 2 (6 dB) dan nilai maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25 (2 dB). Dengan menggunakan simulasi MATLAB didapatkan nilai untuk nilai maksimum sensitivitas dan nilai maksimum sensitivitas

komplementer adalah 1.1098 dan 0.4762 sehingga dapat dikatakan sistem bersifat kokoh karena hasilnya sesuai dengan teori.

Diagram bode untuk analisa kekokohan ini dapat dilihat pada Gambar 4.20 di bawah.



Gambar 4.20 Diagram Bode Sistem AVR dengan Penambahan *Stabilizer*

4.24 Hasil Perbandingan Perancangan Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator (AVR)

Pada bagian ini, akan dilakukan perbandingan hasil simulasi antara sistem *Automatic Voltage Regulator* tanpa menggunakan pengendali H~ Optimal, sistem dengan menggunakan pengendali H~ Optimal, dan sistem dengan penambahan *stabilizer*.

Untuk perbandingan sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu dapat dilihat pada Tabel 4.15. berikut.

Tabel 4.15 Perbandingan performasi sistem lingkak terbuka sistem kendali Automatic Voltage Regulator dalam domain waktu

Kriteria	Tanpa Pengendali H~ Optimal	Dengan Pengendali H~ Optimal	Dengan Penambahan Stabilizer
Tipe Sistem	0	0	0
Konstanta Kesalahan Posisi (K_p)	10.000	17.6909	0.9091
Konstanta Kesalahan Kecepatan (K_v)	0	0	0
Konstanta Kesalahan Percepatan (K_a)	0	0	0
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.0909	0.0535	0.5238
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju Satuan	∞	∞	Tak Hingga
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik Satuan	∞	∞	Tak Hingga

Berdasarkan tabel 4.15. di atas, nilai konstanta kesalahan menjadi lebih kecil setelah ditambahkan pengendali ataupun stabilizer. Perubahan konstanta kesalahan (K_p) dan koefisien kesalahan keadaan mantap pada sistem AVR setelah digunakannya pengendali H~ Optimal ini akan meningkatkan ketelitian dan performansi sistem eksitasi.

Untuk perbandingan sistem lingkak tertutup dalam domain waktu dapat dilihat pada Tabel 4.16. berikut:

Tabel 4.16 Perbandingan Performasi Sistem Lingkak Tertutup Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator dalam Domain Waktu

Kriteria	Tanpa Pengendali H~ Optimal	Dengan Pengendali H~ Optimal	Dengan Penambahan Stabilizer
Rise Time (T_r)	0.2534	0.0866	1,0115
Settling Time (T_s)	19.0812	0.1354	1,9127
Maximum Overshoot	82.7892%	1.9689 %	0,0000
Waktu Puncak	0.7686	0.1869	0,4761
Nilai Puncak	1.6617	0.9651	4,3233

Dari gambar dapat dilihat bagaimana respon sistem terhadap undak masukan yang diberikan. Dapat dilihat bahwa sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* dengan menggunakan pengendali H_{∞} memiliki respon yang paling baik dan mencapai kestabilan dalam waktu yang cepat dibandingkan dengan dua metoda lainnya.

Untuk analisa kestabilan sistem dalam domain waktu ini, cara yang dilakukan adalah dengan melihat nilai akar-akar persamaan karakteristik sistem. Adapun perbandingan hasil analisa kestabilan sistem dalam domain waktu ini dapat dilihat pada Tabel 4.18. berikut.

Tabel 4.17 Analisa Kestabilan dalam Domain Waktu Menggunakan Persamaan Karateristik

Kriteria	Tanpa Metoda H~ Optimal				Dengan Metoda H~ Optimal									Dengan Penambahan Stabilizer				
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
Akar Persamaan Karakteristik	-0.2020 + 4.4800i	-0.2020 - 4.4800i	-16.5000 + 0.4680i	-16.5000 - 0.4680i	-1.00	-2.50	-5.00	-5.00	-10.00	-21.9+17.5i	-21.9-17.5i	-180.00	-2290.00	-2.0800	-4.6500 + i15.2000	-4.6500 - i15.2000	-19.4000	-103.0000
Faktor Redaman (ζ)	0.0451	0.0451	1.0000	1.0000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.781	0.781	1.00	1.00	1.0000	0.2920	0.2920	1.0000	1.0000
Nilai Frekuensi Alamiah Tidak Terejam (ω_n)	4.4800 rad/detik	4.4800 rad/detik	16.6000 rad/detik	16.6000 rad/detik	1.00	2.50	5.00	5.00	10.00	28.0	28.0	180.00	2290	2.0800 rad/detik	15.9000 rad/detik	15.9000 rad/detik	19.4000 rad/detik	103.0000 rad/detik

Untuk performansi sistem AVR dalam domain frekuensi, sistem juga ditinjau dalam sistem lingkaran terbuka dan sistem lingkaran tertutup. Setelah dilakukan analisa

sistem AVR tanpa menggunakan pengendali H~ Optimal, dengan pengendali H~ Optimal, dan dengan penambahan stabilizer,hasil tersebut dapat dibandingkan baik pada sistem lingkaran terbuka ataupun sistem lingkaran tertutup.

Perbandingan hasil simulasi untuk sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, nilai dari kriteria yang didapatkan meliputi margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa, dan frekuensi margin fasa. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.18 berikut.

Tabel 4.18Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Tanpa Metoda H~ Optimal	DenganMetoda H~ Optimal	Dengan Penambahan Stabilizer
Margin Penguatan	1.9250 dB	13.2633 dB	11.2476 dB
Frekuensi Margin Penguatan	6.1238 rad/detik	89.1742 rad/detik	16.6823 rad/detik
Margin Fasa	18.5936 °	71.1629°	Tak Hingga
Frekuensi Margin Fasa	4.4050 rad/detik	14.9279 rad/detik	Tak Hingga

Sebuah sistem memiliki performansi lebih baik jika memiliki margin penguatan lebih dari 6 dB. Pada Tabel 4.16 di atas, nilai dari margin penguatan bertambah setelah diberi pengendali atau stabilizer, yang mana sebelumnya hanya memiliki nilai sebesar 1.9250 dB. Berdasarkan hasil tersebut, performansi sistem dengan menggunakan pengendali H~ Optimal lebih baik karena memiliki margin penguatan di atas 6 dB.

Sedangkan untuk performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi ini, nilai kriteria yang didapatkan dari hasil simulasi adalah lebar pita (*bandwidth*). Hasil perbandingan nilai lebar pita untuk sistem lingkaran tertutup dalam domain

frekuensi dengan pengendali H_{∞} Optimal, sistem tanpa pengendali H_{∞} Optimal, dan sistem dengan penambahan stabilizer dapat dilihat pada Tabel 4.19 berikut.

Tabel 4.19Performansi Sistem Lingkari Tertutup dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Tanpa Metoda H_{∞} Optimal	Dengan Metoda H_{∞} Optimal	Dengan <i>Stabilizer</i>
Lebar Pita	0.9750 rad/detik	24.7 rad/detik	2.2700 rad/detik

Berdasarkan Tabel 4.19 di atas, nilai lebar pita bertambah setelah sistem menggunakan pengendali H_{∞} optimal atau dengan penambahan *stabilizer*. Seiring bertambahnya nilai dari lebar pita, maka waktu naik (T_r) dan waktu keadaan mantap (T_s) akan semakin cepat, sehingga sistem tidak membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai tegangan yang stabil.

Untuk analisa kestabilannya, sistem AVR dalam domain frekuensi dapat dianalisa dengan menggunakan kriteria Nyquist. Berdasarkan gambar 4.7, gambar 4.11, dan gambar 4.18, semua sistem baik yang tanpa pengendali H_{∞} Optimal, sistem menggunakan pengendali H_{∞} Optimal, maupun sistem dengan tambahan *stabilizer*, ketiga sistem tersebut stabil karena memenuhi syarat kestabilan untuk kriteria nyquist, yaitu plot diagram nyquist tidak melingkupi titik koordinat $(-1,j0)$. Untuk perbandingan batas kestabilan dari sistem tersebut, dapat dilihat pada table 4.20berikut.

Tabel 4.20 Nilai Batas Kestabilan Sistem dengan Kriteria Nyquist dalam Domain Frekuensi

Sistem AVR	Batas Kestabilan Sistem
Tanpa Pengendali H_{∞} Optimal	$-0.1000 < k < 1.9250$
DenganPengendali H_{∞} Optimal	$-0.056526 < k < 13.2633$
Dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>	$-1.1000 < k < 11.2476$

Selain kestabilan, kekokohan dari sebuah sistem dapat diketahui dengan melihat nilai puncak maksimum sensitivitas (M_S) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer (M_T). adapun perbandingan dari sistem AVR tanpa pengendali H~ Optimal, sistem dengan pengendali H~ Optimal, dan sistem denga penambahan stabilizer, dapat dilihat pada Tabel 4.21. berikut.

Tabel 4.21 Perbandingan Kekokohan Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator

Kriteria	Tanpa PengendaliH~ Optimal	DenganPengendali H~ Optimal	Dengan Penambahan Stabilizer
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas (MS)	9.9795	1.2797	1.1098
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer (MT)	9.6315	0.9465	0.4762

Sebuah sistem yang kokohadalah sistem yang tahan terhadap gangguan, dimana nilai puncak maksimum sensitivitas (M_S) kurang dari 2 (6 dB) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer (M_T) kurang dari 1.25 (2 dB). Berdasarkan hasil perbandingan yang ada pada Tabel 4.18 di atas, nilai puncak maksimum sensitifias berkurang hingga di bawah2 dan nilai puncak maksimum sensittifitas komplementermenjadi kecil juga setelah sistem menggunakan pengendali H~ Optimal dan stabilizer. Dengan demikian, sistem dengan pengendali H~ Optimal memenuhi syarat secara teori dan kokoh terhadap gangguan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Berdasarkan simulasi sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan menggunakan metoda H~ Optimal terlihat bahwa:
 - Dalam domain waktu, simulasi sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan pengendali H~ Optimal memberikan tanggapan yang lebih baik daripada sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) tanpa menggunakan pengendali, dengan nilai waktu keadaan mantap 1.9127 detik dan semua akar-akar dari persamaan karakteristik bernilai negatif sehingga dapat dikatakan sistem bersifat stabil.
 - Dalam domain frekuensi, sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menggunakan pengendali H~ Optimal memberikan tanggapan yang lebih baik daripada simulasi sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) tanpa pengendali, dengan nilai margin penguat besar dari 6 dB, yaitu 13.2633 dB dan nilai lebar pita 24.70 rad/detik sehingga akan mempercepat waktu naik (T_r) dan waktu keadaan mantap (T_s).
 - Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menggunakan pengendali H~ Optimal lebih kokoh terhadap gangguan, mampu meredam gangguan pada

frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang lebih cepat terhadap masukan tertentu dari pada simulasi sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) tanpa menggunakan pengendali.

2. Berdasarkan kriteria Nyquist, sistem bersifat stabil untuk semua simulasi sistem *Automatic Voltage Regulator* baik sistem dengan menggunakan pengendali H_{∞} Optimal, sistem tanpa menggunakan metoda H_{∞} Optimal, maupun sistem dengan penambahan *stabilizer*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diharapkan metoda H_{∞} Optimal dapat diimplementasikan dalam perancangan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan informasi yang telah didapatkan pada penelitian ini. Selain itu, diharapkan penelitian selanjutnya dapat melakukan pengembangan yang lebih baik dari sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Amin Setiadji, "*Implementasi Kontroler PID Pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Pengaturan Tegangan Eksitasi Generator Sinkron 3 Fasa*", Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
2. Dukupati R.V, "*Analysis and Design of Control Sistem Using Matlab*", New Age International Publishers, India, 2006
3. Dibyo Laksono, Heru, "*Analisa dan Perancangan Sistem Kendali Dengan Matlab*", CV Ferila, Padang, 2011
4. Dibyo Laksono, Heru, "*Analisa dan Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor Arus Searah dengan Meted H ∞* ", Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas.
5. Franklin, G. F, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, "*Feedback Control of Dynamic Systems*", Addison – Wesley Publishing Company, New York, 1986
6. Fiendland, B., "*Control Sistem Design*", McGraw-Hill, New York, 1986.
7. Kundur, Prabha, "*Power Sistem Stability and Control* ", Prentice Hall, New Jersey, 1993.
8. Karnoto, Muhammad Facta, Aris Triwiyatno, "*Perbandingan Pengaruh Sistem Eksitasi Konvensional dan Non Konvensional Terhadap Kestabilan Generator Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Kelistrikan* ", Proceedings Seminar Sistem Tenaga Elektrik, Bandung, ITB, 2000.

9. Fauzi, Muhammad Imam. "*Sistem Penguatan Tanpa Sikat (Brushless Excitation Sistem) Pada Generator PLTU Unit 3 Tambak Lorok Semarang*". Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
10. NW, Endriyanto, "*Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan Algoritma Genetik*", Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
11. Ogata, Katsuhiko, "*Modern Control Engineering*", Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
12. S. Skogestad and I. Postlethwaite, "*Multivariable Feedback Control Analysis and Design*", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996
13. S. Bahram and H. Michael, "*Control Sistem Design Using Matlab*", Prentice Hall, New Jersey, 1995.
14. Saadat, Hadi, "*Power Sistem Analysis*", Mc Graw Hill, Canada, 1999.
15. Trias Handayanto, Rahmadya, 2012, Kriteria Kestabilan Nyquist, <http://rahmadyatrias.wordpress.com/2012/05/23/kriteria-kestabilan-nyquist/#comment-1247>, diakses pada tanggal 5 Oktober 2012.
16. Xue, Dingyu, Chen and D.P Atherton, "*Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab*", SIAM, Philadelphia, 2007

LAMPIRAN A

LISTING PROGRAM ANALISA SISTEM KENDALI AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

```
clc
clear all
close all

% Data - Data Parameter Sistem Eksitasi Tanpa Stabilizer
Ka = 10.0000;
Ta = 0.1000;
Ke = 1.0000;
Te = 0.4000;
Kg = 1.0000;
Tg = 1.0000;
Kr = 1.0000;
Tr = 0.0500;

%
% Sistem Lingkaran Terbuka Tanpa Pengendali H~ Optimal
disp('Sistem Lingkaran Terbuka Tanpa Pengendali H~ Optimal')

num_A = [ 0    Ka];
den_A = [ Ta    1];
num_E = [ 0    Ke];
den_E = [ Te    1];

[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_2 = [ 0    Kg];
den_2 = [ Tg    1];

[num_ol,den_ol] = series(num_1,den_1,num_2,den_2);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol)
```

```

%
% Persamaan Keadaan Sistem Lingkar Terbuka Tanpa Pengendali H~
Optimal
disp('Persamaan Keadaan Sistem Lingkar Terbuka Tanpa Pengendali H~
Optimal')
G = ss(sys_ol);
A = G.a
B = G.b
C = G.c
D = G.d
%
% Sistem Lingkar Tertutup Tanpa Pengendali Pengendali H~ Optimal
disp('Sistem Lingkar Tertutup Tanpa Pengendali Pengendali H~
Optimal')
num_H = [ 0 Kr];
den_H = [ Tr 1];
[num_cl,den_cl] = feedback(num_ol,den_ol,num_H,den_H,-1);
sys_cl = tf(num_cl,den_cl)
%
% Perancangan Pengendali H~ Optimal
s = tf('s');
% Fungsi Bobot W1
W1 = 10*(0.005*s + 2)/(0.100*s + 1 );
% Fungsi bobot W2
W2 = 0.1*(0.005*s + 0.9)/(0.200*s + 1 );
% Fungsi bobot W3
W3 = 0.1*(0.005*s + 0.9)/(0.200*s + 1 );

```

```

S_T = augtf(G,W1,W2,W3);
[gamma,Gc] = hinftpt(S_T)
%
% Fungsi Alih Pengendali H~ Optimal
disp('Fungsi Alih Pengendali H~ Optimal')
Ak = Gc.a;
Bk = Gc.b;
Ck = Gc.c;
Dk = Gc.d;
[numc,denc] = ss2tf(Ak,Bk,Ck,Dk);
sysk = tf(numc,denc)
%
% Sistem Lingkar Terbuka Dengan Pengendali H~ Optimal
disp('Sistem Lingkar Terbuka Dengan Pengendali H~ Optimal')
G_o = G * Gc
A = G_o.a;
B = G_o.b;
C = G_o.c;
D = G_o.d;
[numopen,denopen] = ss2tf(A,B,C,D);
GH = tf(numopen,denopen)
%
% Sistem Lingkar Tertutup Dengan Pengendali H~ Optimal
disp('Sistem Lingkar Tertutup Dengan Pengendali H~ Optimal')
G_c = feedback(G_o,1);
A = G_c.a;
B = G_c.b;

```

```

C = G_c.c;
D = G_c.d;
[numcl,dencl] = ss2tf(A,B,C,D);
T = tf(numcl,dencl)
%
% Akar - Akar Persamaan Karakteristik Sistem Lingkar Tertutup
disp('Akar - Akar Persamaan Karakteristik Tanpa Pengendali H~
Optimal')
damp(sys_cl)
disp('Akar - Akar Persamaan Karakteristik Dengan Pengendali H~
Optimal')
damp(T)
%
% Performasi Sistem Dalam Domain Waktu Tanpa dan Dengan Pengendali
H~ Optimal
disp('Performansi Sistem Dalam Domain Waktu Tanpa Pengendali H~
Optimal')
P1 = stepinfo(sys_cl)
disp('Performansi Sistem Dalam Domain Waktu Dengan Pengendali H~
Optimal')
P2 = stepinfo(T)
%
% Konstanta Kesalahan dan Kesalahan Keadaan Mantap Tanpa dan Dengan
% Pengendali H~ Optimal
disp('Perhitungan Konstanta Kesalahan dan Kesalahan Keadaan Mantap
Tanpa Pengendali H~ Optimal')
errortf(num_ol,den_ol)

```

```

disp('Perhitungan Konstanta Kesalahan dan Kesalahan Keadaan Mantap
Dengan Pengendali H~ Optimal')
errortf(numopen,denopen)

% Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Frekuensi Tanpa
dan
% Dengan Pengendali H~ Optimal
disp('Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Frekuensi
Tanpa Pengendali H~ Optimal')
y1 = allmargin(sys_ol)
disp('Performansi Sistem Lingkar Terbuka Dalam Domain Frekuensi
Dengan Pengendali H~ Optimal')
y2 = allmargin(GH)
%
% Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Frekuensi Tanpa
dan Dengan Pengendali H~ Optimal
r=abs(roots(den_ol));
i=find(r>0); rp=r(i);
rmx=max(rp); rmn=min(rp);
wst=0.1*round(rmn);
wf=20*round(rmx);;dw=wf/800;
w=wst:dw:wf;
disp('Performansi Sistem Lingkar Tertutup Dalam Domain Frekuensi
Tanpa Pengendali H~ Optimal')
[M1,ph1,w]=bode(num_ol,den_ol,w);
frqspec(w,M1)

```

```

disp('Performansi Sistem Lingkak Tertutup Dalam Domain Frekuensi
Dengan Pengendali H~ Optimal')
[M2,ph2,w]=bode(numcl,denc1,w);
frqspec(w,M2)

%
% Kriteria Batas Kestabilan Dalam Domain Waktu Tanpa dan Dengan
Metoda H~
% Dengan Kriteria Hurwitz
disp('Batas Kestabilan Tanpa Metoda H~ Optimal')
hurwitz([den_cl])
disp('Batas Kestabilan Dengan Metoda H~ Optimal')
hurwitz([denc1])

%
% Kriteria Batas Kestabilan Tanpa dan Dengan Pengendali H~ Optimal
% Dengan Diagram Nyquist
figure
subplot(211)
disp('Batas Kestabilan Tanpa Pengendali H~ Optimal')
newnyq(num_ol,den_ol)
grid on
subplot(212)
disp('Batas Kestabilan Dengan Pengendali H~ Optimal')
newnyq(numopen,denopen)
grid on

%
% Kriteria Puncak Maksimum Tanpa dan Dengan Pengendali H~
Optimal

```

```

disp('Kriteria Puncak Maksimum Fungsi Sensitivitas Tanpa Pengendali
H~ Optimal')
Ms1=norm((1 - sys_cl),inf,1e-4)
disp('Kriteria Puncak Maksimum Fungsi Sensitivitas Komplementer
Tanpa Pengendali H~ Optimal')
Mt1=norm(sys_cl,inf,1e-4)

disp('Kriteria Puncak Maksimum Fungsi Sensitivitas Dengan Pengendali
H~ Optimal')
Ms2=norm((1 - T),inf,1e-4)
disp('Kriteria Puncak Maksimum Fungsi Sensitivitas Komplementer
Dengan Pengendali H~ Optimal')
Mt2=norm(T,inf,1e-4)

%
% Letak Pole Zero Sistem Lingkaran Tertutup Tanpa dan Dengan
Pengendali H~ Optimal

figure
subplot(211)
pzmap(sys_cl)
title('Letak Pole Zero Sistem Lingkaran Tertutup Tanpa Pengendali H~
Optimal')
grid on
subplot(212)
pzmap(T)
title('Letak Pole Zero Sistem Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali H~
Optimal')
grid on

```

```

%
% Tanggapan Sistem Terhadap Masukan Undak Satuan Tanpa dan Dengan
% Pengendali H~ Optimal

figure
subplot(211)

t = 0:0.01:10.00;

[y,x,t] = step(num_cl,den_cl,t);

plot(t,y,'k-');

ylabel('Tegangan')

grid on

title('Tanggapan Sistem Tanpa Pengendali Pengendali H~ Optimal')

subplot(212)

t0 = 0:0.01:2.00;

[y1,x1,t1] =step(numcl,denc1,t0);

plot(t1,y1,'k-');

ylabel('Tegangan')

grid on

title('Tanggapan Sistem Dengan Pengendali H~ Terhadap Masukan Undak
Satuan' )

%
% Diagram Bode Tanpa dan Dengan Pengendali H~ Optimal

figure

subplot(211)

margin(num_ol,den_ol)

grid on

subplot(212)

margin(numopen,denopen)

```

```

grid on

%
% Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Fungsi Sensitivitas Komplementer
Tanpa
% dan Dengan Pengendali  $H^\infty$  Optimal

figure

subplot(211)

loops = loopsens(tf(num_ol,den_ol),1);

bode(loops.Si,'r',loops.Ti,'b')

grid on

subplot(212)

loops1 = loopsens(tf(numopen,denopen),1);

bode(loops1.Si,'r',loops1.Ti,'b')

grid on

```

LAMPIRAN B

HASIL RUNNING PROGRAM SISTEM KENDALI AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

<< H-Infinity Optimal Control Synthesis >>

No	Gamma	D11<=1	P-Exist	P>=0	S-Exist	S>=0	lam(PS)<1	C.L.
1.	1.0000e+000	OK	FAIL	FAIL	OK	OK	OK	UNST
2.	5.0000e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
3.	2.5000e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
4.	1.2500e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
5.	1.8750e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
6.	2.1875e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
7.	2.0313e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
8.	1.9531e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
9.	1.9141e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
10.	1.8945e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
11.	1.9043e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB

Iteration no. 11 is your best answer under the tolerance: 0.0100 .

gamma = 0.1904

a =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6
x1	-81.98	-2.921	-5.881	-134.6	-710.3	3.629e+004
x2	-2.415	-5.091	-0.1618	-4.019	-20.41	1056
x3	1.883	0.08041	-5.744	-5.019	-32.95	1688
x4	0.0002899	0.03567	-3.638	-39.04	-209.4	1.07e+004
x5	-1.249	-0.05302	0.5808	4.064	-37.46	1909
x6	3.972	0.1838	-5.68	-48.27	5.752	-3339

b =

u1

x1	4.935e-005
x2	-3.043e-006
x3	0.000224
x4	0.005811
x5	-1.859
x6	-580.1

c =

x1	x2	x3	x4	x5	x6
----	----	----	----	----	----

y1	22.01	0.8307	2.11	42.5	227.3	-1.162e+004
----	-------	--------	------	------	-------	-------------

d =

u1

y1	0
----	---

Continuous-time model.

Fungsi Alih Pengendali H~ Optimal

Transfer function:

$$6.739e006 s^5 + 1.584e008 s^4 + 1.331e009 s^3 + 4.97e009 s^2 + 8.003e009 s + 4.212e009$$

$$s^6 + 3509 s^5 + 9.455e005 s^4 + 7.793e007 s^3 + 1.31e009 s^2 + 7.716e009 s + 1.499e010$$

Sistem Lingkaran Terbuka Dengan Pengendali H~ Optimal

a =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x1	-13.5	-4.687	-1.562	88.03	3.323	8.441	170	909.4	-4.647e+004
x2	8	0	0	0	0	0	0	0	0
x3	0	2	0	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	-81.98	-2.921	-5.881	-134.6	-710.3	3.629e+004
x5	0	0	0	-2.415	-5.091	-0.1618	-4.019	-20.41	1056

x6	0	0	0	1.883	0.08041	-5.744	-5.019	-32.95	1688
x7	0	0	0	0.0002899	0.03567	-3.638	-39.04	-209.4	1.07e+004
x8	0	0	0	-1.249	-0.05302	0.5808	4.064	-37.46	1909
x9	0	0	0	3.972	0.1838	-5.68	-48.27	5.752	-3339

b =

u1

x1	0
x2	0
x3	0
x4	4.935e-005
x5	-3.043e-006
x6	0.000224
x7	0.005811
x8	-1.859
x9	-580.1

c =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
y1	0	0	3.906	0	0	0	0	0	0

d =

u1

y1 0

Continuous-time model.

Transfer function:

$$\frac{9.095e-013 s^8 + 1.863e-009 s^7 + 3.874e-007 s^6 + 1.685e009 s^5 + 3.959e010 s^4 + 3.327e011 s^3 + 1.243e012 s^2 + 2.001e012 s + 1.053e012}{s^9 + 3522 s^8 + 9.929e005 s^7 + 9.083e007 s^6 + 2.398e009 s^5 + 2.835e010 s^4 + 1.702e011 s^3 + 5.245e011 s^2 + 7.552e011 s + 3.749e011}$$

Sistem Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali H~ Optimal

Transfer function:

$$\frac{3.638e-012 s^8 + 2.212e-009 s^7 + 1.341e-007 s^6 + 1.685e009 s^5 + 3.959e010 s^4 + 3.327e011 s^3 + 1.243e012 s^2 + 2.001e012 s + 1.053e012}{s^9 + 3522 s^8 + 9.929e005 s^7 + 9.083e007 s^6 + 4.082e009 s^5 + 6.794e010 s^4 + 5.03e011 s^3 + 1.767e012 s^2 + 2.756e012 s + 1.428e012}$$

Akar - Akar Persamaan Karakteristik Tanpa Pengendali H~ Optimal

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-2.02e-001+4.48e+000i	4.51e-002	4.48e+000
-2.02e-001-4.48e+000i	4.51e-002	4.48e+000
-1.65e+001+4.68e-001i	1.00e+000	1.66e+001
-1.65e+001-4.68e-001i	1.00e+000	1.66e+001

Akar - Akar Persamaan Karakteristik Dengan Pengendali H~ Optimal

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-1.00e+000	1.00e+000	1.00e+000
-2.50e+000	1.00e+000	2.50e+000
-5.00e+000	1.00e+000	5.00e+000
-5.00e+000	1.00e+000	5.00e+000
-1.00e+001	1.00e+000	1.00e+001
-4.75e+001+4.08e+001i	7.59e-001	6.26e+001
-4.75e+001-4.08e+001i	7.59e-001	6.26e+001
-1.81e+002	1.00e+000	1.81e+002
-3.22e+003	1.00e+000	3.22e+003

· Performansi Sistem Dalam Domain Waktu Tanpa Pengendali H~ Optimal

P1 =

RiseTime : 0.2534

SettlingTime : 19.0812

SettlingMin : 0.2560

SettlingMax : 1.6617

Overshoot : 82.7892

Undershoot : 0

Peak : 1.6617

PeakTime : 0.7686

Performansi Sistem Dalam Domain Waktu Dengan Pengendali H~ Optimal

P2 =

RiseTime : 0.0393

SettlingTime : 0.0951

SettlingMin : 0.6714

SettlingMax : 0.7548

Overshoot : 2.3553

Undershoot : 0

Peak : 0.7548

PeakTime : 0.0850

Perhitungan Konstanta Kesalahan dan Kesalahan Keadaan Mantap Tanpa Pengendali H~ Optimal

Tipe Sistem adalah 0

Konstanta Kesalahan Posisi (Kp) adalah 10.0000

Konstanta Kesalahan Kecepatan (Kv) adalah 0.0000

Konstanta Kesalahan Percepatan (Ka) adalah 0.0000

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak adalah 0.0909

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju adalah Inf

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik adalah Inf

Perhitungan Konstanta Kesalahan dan Kesalahan Keadaan Mantap Dengan Pengendali H~

OptimalTipe Sistem adalah 0

Konstanta Kesalahan Posisi (Kp) adalah 2.8090

Konstanta Kesalahan Kecepatan (Kv) adalah 0.0000

Konstanta Kesalahan Percepatan (Ka) adalah 0.0000

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak adalah 0.2625

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju adalah Inf

Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik adalah Inf

Performansi Sistem Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi Tanpa Pengendali H~ Optimal

y1 =

GainMargin : 1.9250

GMFrequency : 6.1238

PhaseMargin : 18.5936

PMFrequency : 4.4050

DelayMargin : 0.0737

DMFrequency : 4.4050

Stable : 1

Performansi Sistem Lingkak Terbuka Dalam Domain Frekuensi Dengan Pengendali H~ Optimal

y2 =

GainMargin : 10.0344

GMFrequency : 140.1792

PhaseMargin : 90.5364

PMFrequency : 25.3356

DelayMargin : 0.0624

DMFrequency : 25.3356

Stable : 1

Performansi Sistem Lingkak Tertutup Dalam Domain Frekuensi Tanpa Pengendali H~ Optimal

Bandwidth = 0.975

Performansi Sistem Lingkak Tertutup Dalam Domain Frekuensi Dengan Pengendali H~ Optimal

Bandwidth = 55