

Pemodelan, Simulasi, dan Analisis Sistem Regulator Tegangan Otomatis Generator Sinkron Dengan Pengendali PID

Ari Puji Prasetyo^{a*}

^a Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe
*prasetyo@strcepu.ac.id

Diterima : 29-12-2024

- Direview : 30-12-2024

- Diterbitkan : 31-12-2024

Intisari

Kemampuan suatu generator sinkron untuk mempertahankan tegangan terminal ketika terjadi perubahan beban terhubung adalah salah satu karakteristik fundamental dalam analisis stabilitas sistem tenaga. Regulator tegangan otomatis, yang bertanggung jawab terhadap proses stabilisasi tegangan terminal, merupakan suatu sistem kendali umpan balik yang mengukur tegangan keluaran untuk dibandingkan dengan tegangan referensi yang selanjutnya menghasilkan sinyal galat. Pada gilirannya sinyal galat ini akan mengendalikan sistem eksitasi setelah mengalami amplifikasi. Artikel ini membahas pemodelan, simulasi, dan analisis dari sistem regulator tegangan otomatis sederhana. Perangkat yang dipergunakan membangun model sistem adalah penguat, pengeksitasi, generator, dan sensor tegangan yang masing-masing direpresentasikan sebagai sistem orde satu dalam domain frekuensi. Analisis stabilitas Routh-Hurwitz yang diverifikasi dengan *root-locus* digunakan untuk menentukan nilai *gain* dari penguat yang menghasilkan sistem kendali stabil. Respons langkah diperbaiki dengan menyertakan stabilisator orde satu dengan satu *zero* di titik asal. Untuk mengetahui pengaruh nilai *gain* terhadap karakteristik respons langkah dilakukan *parameter sweep* terhadap *gain* dari penguat dan stabilisator. Karakteristik respons langkah yang diamati adalah waktu naik, waktu tunak, dan *overshoot*. Pengendali PID digunakan untuk mereduksi galat keadaan stabil respons langkah. Melalui penalaan pengendali PID diperoleh respons langkah sistem tanpa galat keadaan stabil, *overshoot* yang rendah, dan waktu naik serta waktu tunak yang singkat.

Kata Kunci: Regulator tegangan otomatis; Stabilitas Routh-Hurwitz; *parameter sweep*; Respons langkah; Pengendali PID

Abstract

The ability of a synchronous machine to maintain terminal voltage in case of change in connected load is one of the fundamental characteristics in power system stability analysis. Automatic voltage regulator, which is responsible for the terminal voltage stabilization process, is a feedback control system that measures the output voltage to compare with the reference voltage which then produces an error signal. In turn, this error signal will control the excitation system after being amplified. This article discusses the modeling, simulation, and analysis of a simple automatic voltage regulator system. The devices used to construct the system model are amplifier, exciter, generator, and voltage sensor, each of which is approximated using a first-order system in the frequency domain. Root-locus verified Routh-Hurwitz stability analysis is used to determine the amplifier's gain that produces a stable control system. The step response is improved by introducing a first-order stabilizer with one zero at the origin to the system. To determine how the gains effect step response characteristics, a parameter sweep is carried out on the gain of the amplifier and stabilizer. The observed characteristics of the step response are rise time, steady-state time, and overshoot. PID controller is employed to reduce the steady state error of the step response. By proper tuning the PID controller, system's step response without steady state error, low overshoot, and short rise and steady times is obtained.

Keywords: Automatic voltage regulator; Routh-Hurwitz stability; parameter sweep; step response; PID controller

1. Pendahuluan

Sistem eksitasi generator mempertahankan tegangan generator dan mengendalikan aliran daya reaktif. Eksitasi dari sistem terdahulu dapat diberikan misalnya melalui cincin selip dan sikat menggunakan generator DC yang disematkan pada batang yang sama dengan rotor dari mesin sinkron. Sistem eksitasi modern umumnya menggunakan generator AC yang dilengkapi dengan penyearah berputar, dan dikenal dengan sebutan eksitasi tanpa sikat (Saadat 2010).

Perubahan pada besarnya permintaan daya riil berdampak secara esensial pada frekuensi, sedangkan perubahan pada daya reaktif berdampak terutama pada besarnya tegangan. Interaksi antara pengendalian tegangan dan frekuensi secara umum cukup lemah sehingga analisis keduanya tidak perlu dilakukan secara terpisah (Saadat 2010).

Artikel ini membahas pemodelan sistem regulator tegangan otomatis atau *automatic voltage regulator* (AVR). Sistem yang dibangun tersusun atas bagian penguat (*amplifier*), pengeksitasi (*exciter*), generator, dan sensor. Setiap bagian tersebut didekati menggunakan model sistem orde satu tanpa *zero*. Pemodelan dilakukan dalam domain frekuensi, yaitu model dinyatakan dalam fungsi transfer.

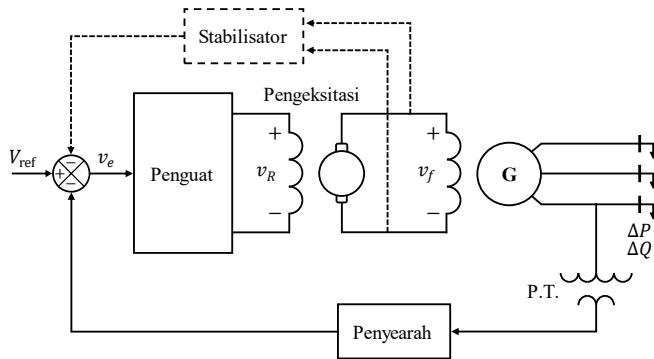
Besaran yang diperhatikan dalam pemodelan dan simulasi adalah tegangan terminal generator. Karakteristik besaran ini akan diamati dalam bentuk respons langkah dari sistem AVR. Stabilitas sistem diupayakan melalui pemilihan parameter penguatan (*gain*) yang tepat. Perbaikan karakteristik dari respons langkah dilakukan dengan memperkenalkan stabilisator yang juga direpresentasikan sebagai sistem orde satu ke dalam sistem AVR. Untuk mendapatkan karakteristik final

yang diinginkan dari respons langkah sistem, di penggunaan pengendali PID.

Artikel ini disusun sebagai berikut: Bagian kedua membahas tipikal dari sistem AVR sederhana dan pemodelan dari bagian-bagian penyusunnya serta pembentukan fungsi transfer dari sistem; Parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan serta tahapan pemodelan dan simulasi diberikan pada bagian ketiga; Hasil yang diperoleh disajikan dan didiskusikan pada bagian keempat; Pada bagian kelima diberikan kesimpulan.

2. Kerangka Teori

Sumber dari daya reaktif adalah generator, kapasitor, dan reaktor. Daya reaktif dari generator dikendalikan oleh eksitasi medan. Metode tambahan lain yang dapat digunakan untuk meningkatkan profil tegangan pada sistem transmisi listrik adalah pengubah *load-tap* transformer, *switched capacitors*, regulator *step-voltage*, dan perangkat pengendali var statik. Alat utama dari pengendali daya reaktif dari generator adalah kendali eksitasi generator menggunakan AVR. Fungsi dari AVR adalah untuk mempertahankan besarnya tegangan terminal generator sinkron pada nilai tertentu. Diagram skematik dari AVR yang telah disederhanakan diberikan pada Gambar 1 (Saadat 2010).



Gambar 1. Bentuk tipikal AVR sederhana

Peningkatan beban daya reaktif generator akan disertai oleh penurunan besarnya tegangan pada terminal generator tersebut. Besarnya tegangan diukur melalui transformator potensial (transformer tegangan) pada salah satu fasenya. Tegangan ini selanjutnya disearahkan dan dibandingkan dengan sinyal DC referensi. Sinyal galat (v_e) yang telah diamplifikasi akan mengendalikan medan eksitasi dan meningkatkan tegangan terminal dari pengeksitasi (v_f). Selanjutnya, arus medan generator akan meningkat yang berakibat pada peningkatan pada emf yang dibangkitkan. Pembangkitan daya reaktif naik ke suatu nilai kesetimbangan baru dan meningkatkan tegangan terminal ke nilai yang diinginkan.

2.1. Model Penguat

Penguat dari sistem eksitasi dapat berupa penguat magnetik, penguat berputar, atau penguat elektronik modern. Penguat diwakili oleh parameter penguatan K_A dan konstanta waktu τ_A . Fungsi transfer dari penguat diberikan oleh persamaan

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

Nilai dari K_A berkisar dari 10 hingga 400 sedangkan kisaran nilai τ_A jauh lebih kecil, dari 0.02 hingga 0.1 detik dan sering kali diabaikan (Saadat 2010).

2.2. Model Pengeksitasi (Exciter)

Terdapat banyak jenis tipe eksitasi yang berbeda. Sistem eksitasi modern menggunakan suatu sumber daya AC yang dilewatkan pada penyearah padat seperti *silicon controlled rectifier* (SCR). Tegangan keluaran dari penyearah merupakan fungsi nonlinier dari tegangan medan karena keberadaan efek saturasi pada sirkuit magnetik. Jadi tidak terdapat relasi sederhana antara tegangan terminal dan tegangan medan pada pengeksitasi. Telah dikembangkan banyak model dengan berbagai tingkat kerumitan dan tersedia pada publikasi rekomendasi IEEE (IEEE-SA Standards Board 2016). Satu model yang cukup baik dari pengeksitasi modern adalah model yang dilinierkan, yang memperhatikan konstanta waktu utama serta mengabaikan saturasi atau ketaklinieran lain. Dalam bentuk yang paling sederhana, fungsi transfer dari pengeksitasi modern dapat dinyatakan menggunakan konstanta waktu τ_E (yang bernilai sangat kecil) dan penguatan K_E , yaitu (Saadat 2010)

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{\tau_E s + 1} \quad (2)$$

2.3. Model Generator

Generator sinkron pembangkit emf merupakan fungsi dari kurva magnetisasi mesin, dan tegangan terminalnya bergantung pada beban yang terhubung dengan generator. Dalam model yang dilinierisasi, fungsi transfer yang menghubungkan tegangan terminal generator dengan tegangan medan dapat dinyatakan menggunakan penguatan K_G dan konstanta waktu τ_G yang membentuk fungsi transfer

$$\frac{V_t(s)}{V_f(s)} = \frac{K_G}{\tau_G s + 1} \quad (3)$$

Kedua parameter tersebut bergantung pada beban, nilai K_G dapat berkisar antara 0.7 hingga 1 sedangkan nilai dari τ_G antara 1.0 dan 2.0 detik dari beban penuh hingga tanpa beban (Saadat 2010).

D. Model Sensor

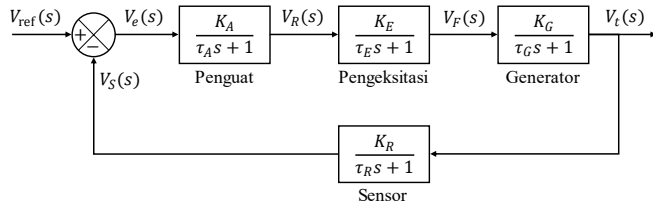
Tegangan terminal diamati pada suatu transformator potensial dan, dalam satu bentuknya, tegangan ini disearahkan menggunakan penyearah jembatan. Sensor tegangan dimodelkan sebagai suatu sistem orde satu sederhana dengan fungsi transfer berupa

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{\tau_R s + 1} \quad (4)$$

Nilai dari konstanta waktu sensor τ_R sangatlah kecil dan dapat diasumsikan berada pada rentang 0.01 hingga 0.06 detik (Saadat 2010).

2.4. Fungsi Transfer Sistem AVR

Dengan menggunakan model-model di atas, Persamaan (1) hingga (4), dapat disusun diagram blok dari AVR seperti yang ditampilkan pada Gambar 2 (Saadat 2010).



Gambar 2. Diagram blok AVR yang disederhanakan

Diperhatikan bahwa fungsi transfer lingkaran terbuka (*open-loop*) dari diagram blok Gambar 2 adalah

$$KG(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G K_R}{\Pi} \quad (5)$$

dengan

$$\Pi = (\tau_A s + 1)(\tau_E s + 1)(\tau_G s + 1)(\tau_R s + 1)$$

Fungsi transfer lingkaran tertutup (*closed-loop*) yang memberikan hubungan antara tegangan terminal generator $V_t(s)$ dan tegangan referensi $V_{ref}(s)$ adalah

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (\tau_R s + 1)}{\Pi + K_A K_E K_G K_R} \quad (6)$$

Apabila sisi kanan dari Persamaan (6) dituliskan sebagai $T(s)$ maka akan diperoleh

$$V_t(s) = T(s)V_{ref}(s) \quad (7)$$

Berdasarkan teorema nilai akhir atau *final value theorem* (Oppenheim, Willsky, and Nawab 1997), untuk masukan langkah $V_{ref}(s) = 1/s$, respons keadaan stabil (*steady-state response*) dari sistem adalah

$$V_{t_{ss}} = \lim_{s \rightarrow 0} s V_t(s) = \frac{K_A}{1 + K_A} \quad (8)$$

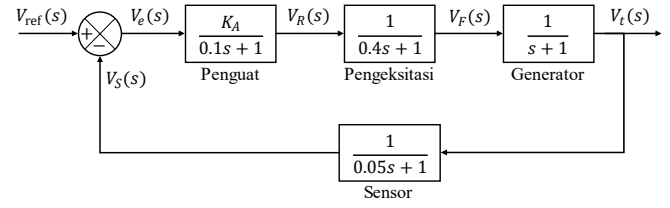
Diindikasikan oleh namanya, respons keadaan stabil hanya ada untuk sistem yang stabil. Secara matematis, Persamaan (8) berlaku untuk semua nilai K_A kecuali $K_A = -1$. Namun demikian, jika nilai K_A tertentu menyebabkan sistem menjadi tidak stabil maka secara fisik limit (8) tidak dapat diterjemahkan sebagai respons keadaan stabil meski nilainya ada.

3. Metodologi

Pemodelan sistem AVR dari generator dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter berikut (Saadat 2010):

Blok	Penguatan	Konstanta waktu
Penguat	K_A	$\tau_A = 0.1$
Pengeksitasi	$K_E = 1$	$\tau_E = 0.4$
Generator	$K_G = 1$	$\tau_G = 1.0$
Sensor	$K_R = 1$	$\tau_R = 0.05$

Dengan menggunakan nilai-nilai parameter di atas, diagram blok Gambar 2 dapat disajikan kembali sebagai berikut.



Gambar 3. Diagram blok AVR dengan nilai parameter

Fungsi transfer lingkaran terbuka dari sistem AVR Gambar 3 diberikan oleh persamaan

$$\begin{aligned} KG(s)H(s) &= \frac{K_A}{(0.1s + 1)(0.4s + 1)(s + 1)(0.05s + 1)} \\ &= \frac{500K_A}{(s + 10)(s + 2.5)(s + 1)(s + 20)} \\ &= \frac{500K_A}{s^4 + 33.5s^3 + 307.5s^2 + 775s + 500} \end{aligned}$$

Selanjutnya dari diperoleh persamaan karakteristik

$$1 + \frac{500K_A}{s^4 + 33.5s^3 + 307.5s^2 + 775s + 500} = 0$$

yang menghasilkan persamaan polinomial karakteristik orde empat berupa

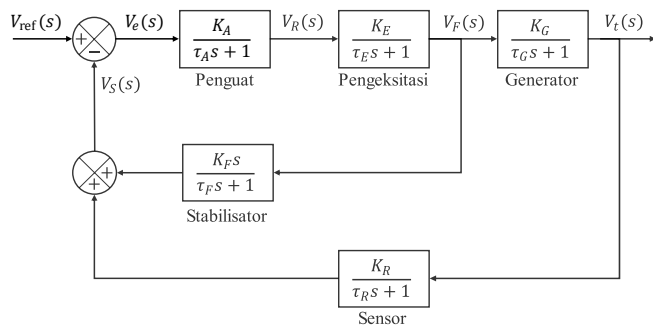
$$s^4 + 33.5s^3 + 307.5s^2 + 775s + 500 + 500K_A = 0 \quad (9)$$

Nilai dari penguatan K_A akan menentukan nilai akar-akar polinomial yang pada gilirannya memberikan kestabilan sistem AVR. Dalam hal ini akan ditentukan rentang nilai K_A , menggunakan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz (Nise 2015; Ogata 2010), yang mengakibatkan semua akar polinomial berada di sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang kompleks. Verifikasi terhadap hasil metode Routh-Hurwitz dilakukan dengan diagram *root-locus* menggunakan MATLAB.

Dengan nilai K_A yang sesuai tersebut selanjutnya disusun model dengan menggunakan program Simulink guna menjalankan simulasi respons langkah (*step response*) dari sistem AVR. Selain itu akan dilihat pengaruh dari nilai K_A terhadap galat keadaan stabil (*steady-state error*).

Guna meningkatkan stabilitas relatif dari sistem, disertakan suatu pengendali yang akan menambahkan sebuah *zero* ke fungsi transfer lingkaran terbuka dari AVR. Untuk melakukan hal ini, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menyertakan umpan balik laju atau *rate feedback*. Diagram blok dari sistem AVR yang dilengkapi stabilisator umpan balik laju ditampilkan pada Gambar 4.

Untuk mereduksi galat keadaan stabil, diimplementasikan pengendali *proporsional-integral-derivatif* atau PID. Selain mengatasi permasalahan galat keadaan stabil, pengendali PID juga dapat memperbaiki respons dinamis sistem. Pengendali PID juga merupakan salah satu pengendali yang tersedia luas secara komersial (Saadat 2010).

Gambar 4. AVR dengan stabilisator *rate feedback*

Model-model dari sistem AVR dibangun dan disimulasikan menggunakan Simulink. Proses *parameter sweep* untuk penguatan K_A dan K_F dilakukan menggunakan MATLAB. Analisis stabilitas *root-locus* juga dikerjakan menggunakan MATLAB. Parameter-parameter dari pengendali PID ditentukan menggunakan bantuan aplikasi *tuner* dari MATLAB (MathWorks 2024).

4. Hasil dan Pembahasan

Tabel Routh-Hurwitz untuk polinomial karakteristik yang diberikan oleh Persamaan (9) adalah

s^4	1	307.5	$500 + 500K_A$
s^3	33.5	775	0
s^2	284.365	$500 + 500K_A$	0
s^1	$716.1 - 58.9K_A$	0	0
s^0	$500 + 500K_A$		

Berdasarkan kriteria Routh-Hurwitz, syarat perlu dan syarat cukup dari suatu sistem yang stabil adalah kolom pertama tabel Routh-Hurwitz memiliki tanda (*sign*) yang sama. Dari baris s^1 tabel di atas dapat dilihat disimpulkan bahwa, untuk stabilitas sistem kendali, nilai K_A haruslah kurang dari 12.16, dan dari baris s^0 , nilai K_A tidak boleh sama atau kurang dari -1 . Dengan demikian, apabila diambil nilai positif untuk K_A , untuk stabilitas sistem kendali, penguatan dari blok penguat harus berada dalam interval

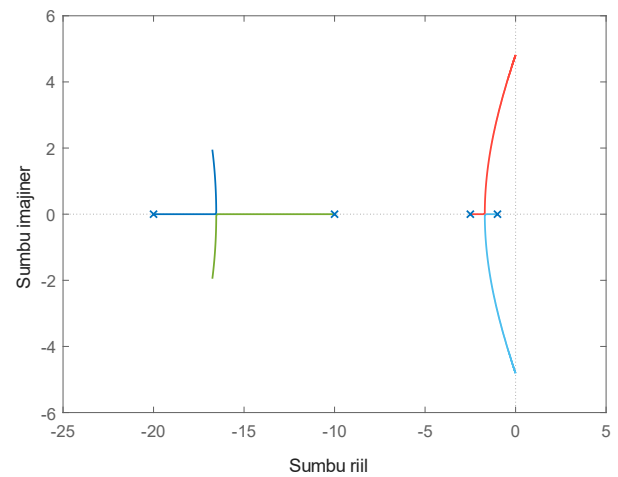
$$0 < K_A < 12.16$$

Untuk $K = 12.16$, persamaan bantuan dari baris s^2 adalah

$$284.365s^2 + 6580 = 0$$

sehingga $s = \pm j4.81$. Dengan demikian, untuk penguatan sebesar 12.16, diperoleh sepasang *pole* konjugat berupa bilangan imajiner murni (kedua *pole* berada pada sumbu imajiner bidang kompleks) yang berarti bahwa sistem kendali adalah stabil marginal (*marginally stable*).

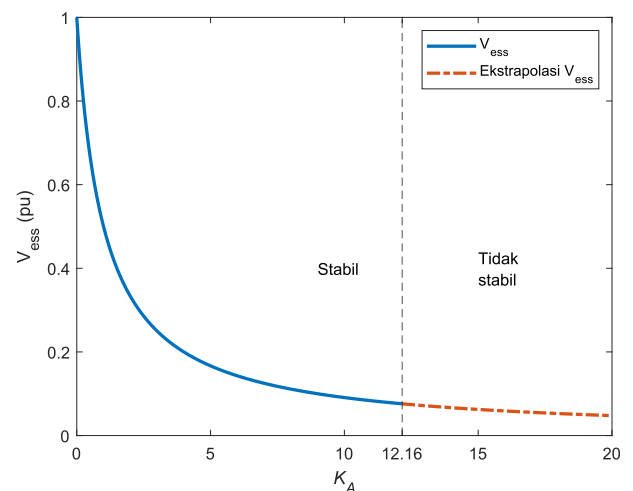
Grafik *root-locus* dari sistem untuk K dari nilai 0 hingga 12.16, yang diperoleh dengan bantuan perangkat lunak MATLAB atau Octave diberikan pada Gambar 5. Diperhatikan bahwa kurva *root-locus* memotong sumbu imajiner di $s = \pm j4.81$. Hal ini terjadi pada nilai $K_A = 12.16$ yang memvalidasi hasil sebelumnya.

Gambar 5. Plot *root-locus* sistem AVR

Berdasarkan Persamaan (8), galat keadaan stabil dari sistem AVR mengikuti persamaan

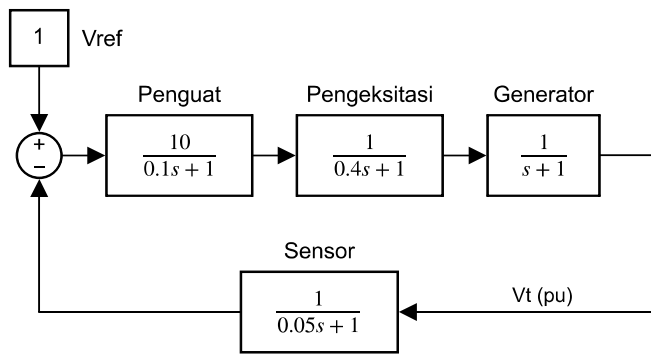
$$V_{ess} = \frac{1}{1 + K_A} \quad (10)$$

Untuk $K_A = 10$ diperoleh nilai $V_{ess} = 0.091$. Grafik dari galat keadaan stabil V_{ess} sebagai dari penguatan K_A diberikan pada Gambar 6. Seperti dapat dilihat dalam gambar ini, atau dari Persamaan (10), untuk memperkecil V_{ess} nilai dari K_A harus diperbesar. Namun demikian penguatan yang melebihi 12.16 akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Karena galat keadaan stabil tidak terdefinisi untuk sistem stabil marginal, maka V_{ess} hanya ada untuk $K_A < 12.16$.

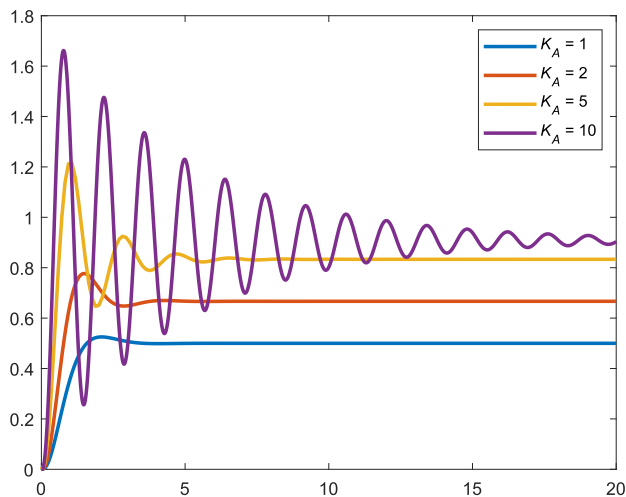


Gambar 6. Galat keadaan stabil

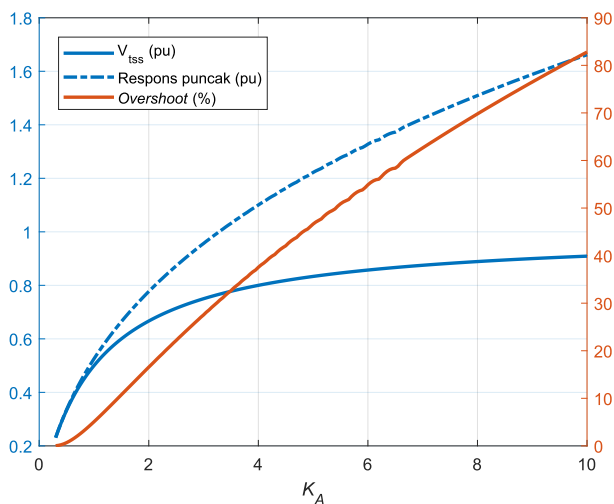
Respons langkah dari sistem AVR ini diperoleh menggunakan MATLAB atau dengan Simulink. Diagram blok simulasi Simulink untuk respons langkah menggunakan penguatan $K_A = 10$ diberikan pada Gambar 7. Hasil simulasi respons langkah untuk beberapa nilai K_A diberikan pada Gambar 8. Untuk melihat pengaruh nilai *gain* penguat terhadap karakteristik dari respons langkah sistem AVR dilakukan *parameter sweep* pada K_A .



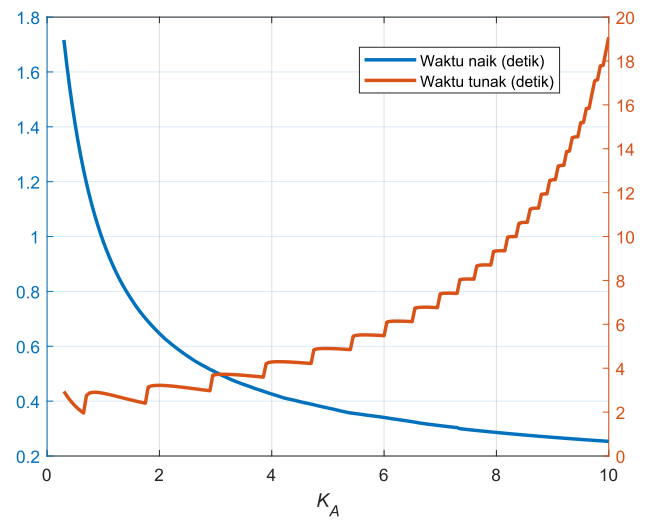
Gambar 7. Diagram blok simulasi respons langkah

Gambar 8. Respons langkah sistem AVR untuk berbagai nilai penguatan K_A

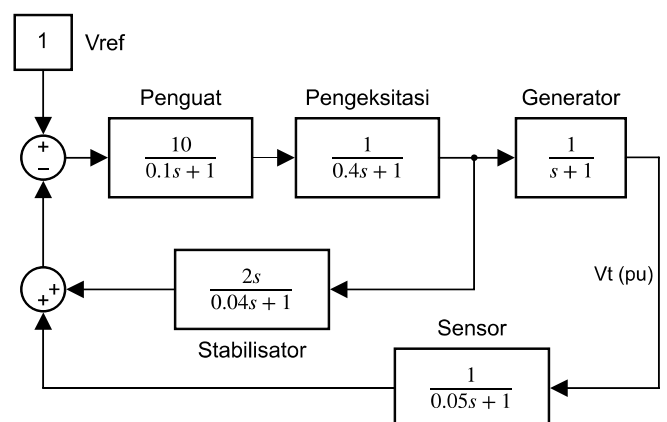
Seperti dapat dilihat pada Gambar 8, respons langkah yang diperoleh untuk nilai $K_A = 10$ tidaklah memuaskan. Tegangan terminal V_t mengalami osilasi yang cukup besar dengan respons puncak mencapai nilai 1.66. Meningkatkan nilai K_A ini, berdasarkan grafik *root-locus* Gambar 5, akan menyebabkan osilasi semakin membesar dan bahkan mengakibatkan sistem AVR menjadi tidak stabil ketika $K_A > 12.16$.

Gambar 9. Pengaruh nilai K_A terhadap V_{tss} , respons puncak, dan overshoot tegangan terminal

Penguatan K_A besar akan menyebabkan tegangan terminal V_t naik dengan cepat yang disertai dengan *overshoot* yang besar pula. Sebaliknya K_A kecil berakibat kenaikan V_t yang lebih lambat dengan *overshoot* kecil. Gambar 10 memberikan hubungan antara nilai K_A dengan waktu naik (*rise time*) dan waktu tunak 2% (Tay, Mareels, and Moore 1997) dari V_t (2%-*settling-time*). Seperti terlihat pada grafik tersebut, kenaikan nilai K_A akan menyebabkan penurunan waktu naik namun hal ini akan disertai dengan (kecenderungan) peningkatan waktu tunak 2%.

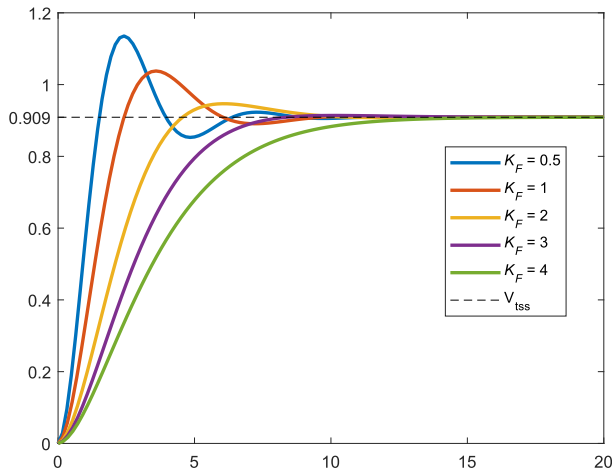
Gambar 10. Waktu naik dan waktu tunak dari V_t sebagai fungsi dari K_A

Implementasi dari sistem Gambar 4, untuk nilai penguatan $K_F = 2$, dalam blok Simulink ditampilkan pada Gambar 11. Respons langkah yang lebih baik dapat diperoleh melalui pemilihan nilai K_F dan τ_F yang tepat. Hasil untuk beberapa nilai penguatan K_F dan konstanta waktu $\tau_F = 0.04$ ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 11. Diagram blok simulasi Simulink AVR

Merujuk pada grafik Gambar 12, penguatan K_F dari stabilisator mempengaruhi besarnya waktu naik, waktu tunak, dan *overshoot* respons langkah sistem AVR. Hubungan nilai K_F terhadap karakteristik respons langkah sistem AVR dapat diketahui secara lebih detail dengan menjalankan *sweep* parameter tersebut.



Gambar 12. Respons langkah AVR ($K_A = 10$) dengan Stabilisator untuk berbagai nilai penguatan K_F

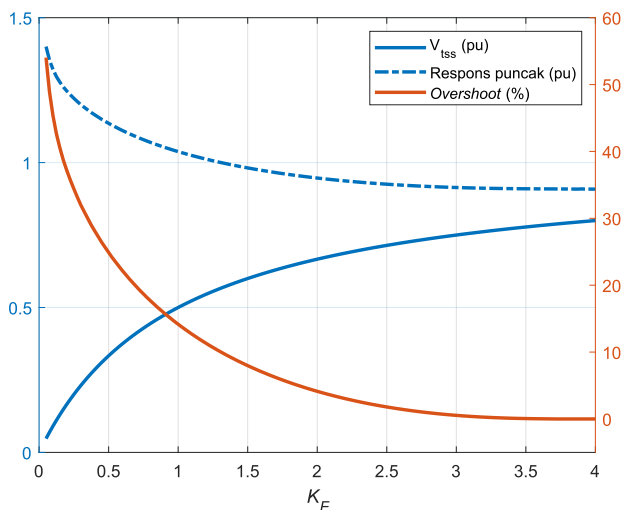
Memfaatkan formula penguatan Mason atau *Mason's gain formula* (Mason 1956), dapat diperoleh fungsi transfer lingkaran terbuka untuk sistem AVR dengan stabilisator, yaitu

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = K \frac{Q(s)}{P(s)} \quad (11)$$

dengan $K = 250$, $Q(s) = s^2 + 45s + 500$, dan $P(s)$ merupakan polinomial orde 5 dengan koefisien s^5 hingga s^0 secara berurutan: 1, 58.5, 1145 + 6250 K_F , 8462.5 + 131250 K_F , 24875 + 125000 K_F , dan 137500. Secara numerik, apabila $K_F > 0$ maka sistem (11) stabil. Respons keadaan stabil dari sistem ini dengan masukan $V_{ref}(t)$ berupa fungsi langkah adalah

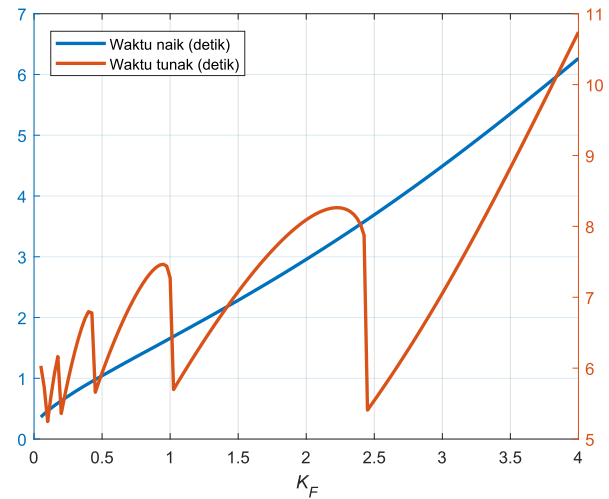
$$V_{tss} = \lim_{s \rightarrow 0} sV_t(s) = \frac{250 \times 500}{137500} = 0.909$$

Pada Gambar 12, respons keadaan stabil ini dinyatakan oleh garis putus-putus. Perlu diperhatikan bahwa nilai limit ini sama dengan V_{tss} sistem AVR tanpa stabilisator dan tidak dipengaruhi oleh nilai K_F ataupun τ_F karena keduanya tidak muncul pada suku s^0 dari $Q(s)$ dan $P(s)$.



Gambar 13. Pengaruh nilai K_F terhadap V_{tss} , respons puncak, dan overshoot tegangan terminal ($K_A = 10$)

Respons transien dari AVR dengan stabilisator jauh lebih baik dengan *overshoot* sebesar 4.13 persen di $t = 7.02$ detik dan waktu tunak 2% kurang lebih 9.09 detik untuk $K_F = 2$. Grafik hubungan antara penguatan K_F dengan V_{tss} , respons puncak, dan *overshoot* tegangan terminal V_t untuk masukan fungsi langkah diberikan pada Gambar 13. Berbeda dengan pengaruh K_A , peningkatan nilai K_F menyebabkan penurunan respons puncak dan *overshoot*. Waktu naik menjadi semakin besar seiring dengan peningkatan K_F . Waktu tunak 2% tetap mengalami kecenderungan naik namun dengan osilasi yang cukup besar seperti terlihat pada Gambar 14.

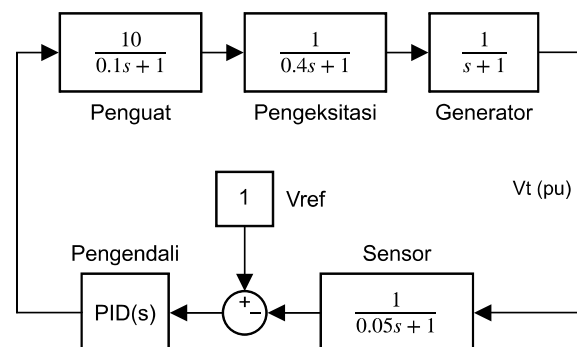


Gambar 14. Waktu naik dan waktu tunak dari V_t sebagai fungsi dari K_F ($K_A = 10$)

Meskipun respons langkah yang diperoleh dari penyertaan stabilisator telah cukup memuaskan namun galat keadaan stabil tidak mengalami perubahan. Untuk mengatasi masalah ini dipergunakan pengendali PID. Pengendali yang diimplementasikan adalah blok PID *built-in* dari Simulink yang telah menyertakan filter *low-pass* pada bagian derivatif. Fungsi transfer dari pengendali ini diberikan oleh persamaan

$$PID(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \left[\frac{K_f}{s + K_f} \right]$$

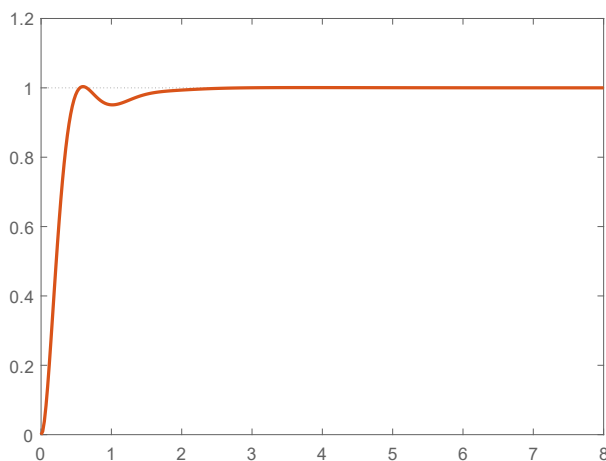
dengan K_p , K_i , dan K_d secara berurutan adalah penguatan proporsional, integral, dan derivatif sedangkan K_f merupakan koefisien filter *low-pass*. Diagram blok Simulink dari AVR dengan pengendali PID diberikan pada Gambar 15.



Gambar 15. AVR dengan pengendali PID

Bagian derivatif dari pengendali PID akan menambahkan sebuah *zero* berhingga pada fungsi transfer lingkaran terbuka sistem AVR. Hal ini meningkatkan response transien sistem. Satu *pole* di titik asal ditambahkan oleh bagian integral dari pengendali PID yang meningkatkan tipe sistem satu tingkat dan mereduksi galat keadaan stabil, yang terkait dengan masukan fungsi langkah, menjadi nol.

Nilai-nilai dari parameter PID ditata menggunakan aplikasi *PID Tuner* dari MATLAB. Kriteria dalam penalaan ini adalah meminimalkan *overshoot* dan waktu tunak 2%. Nilai-nilai parameter yang dipilih adalah $K_p = 0.484337659127996$, $K_i = 0.32035030397111$, $K_d = 0.18182651153399$, dan $K_f = 435.109795573259$. Respons langkah dari sistem AVR dengan pengendali PID yang menggunakan nilai-nilai parameter tersebut diberikan pada Gambar 16. Dengan pengendali PID ini diperoleh waktu naik 0.323 detik, *overshoot* sejauh 0.351 persen di $t = 0.585$, dan waktu tunak 2% sebesar 1.47 detik.



Gambar 16. Respons langkah AVR dengan PID yang telah ditata

5. Simpulan

Dengan pemilihan nilai penguatan K_A yang tepat sistem AVR stabil dapat diperoleh. Dalam hal ini interval nilai K_A yang memberikan stabilitas sistem adalah bilangan positif kurang dari 12.16. Nilai dari K_A yang besar menyebabkan tegangan terminal meningkat dengan cepat yang disertai oleh *overshoot* dan memperkecil galat keadaan stabil pada respons langkah sistem. Stabilisator orde satu dengan sebuah *pole* yang ditambahkan ke dalam sistem AVR mampu memperbaiki respons langkah dalam hal besarnya *overshoot* dan waktu tunak 2%. Keberadaan stabilisator ini tidak memberikan pengaruh terhadap besarnya galat keadaan stabil, karena kedua parameternya tidak muncul pada suku s^0 bagian pembilang dan penyebut dari fungsi transfer lingkaran terbuka sistem AVR yang bersangkutan. Implementasi dari pengendali PID pada sistem AVR yang disertai dengan penalaan yang tepat telah berhasil menghilangkan galat keadaan stabil dan mereduksi waktu naik, *overshoot*, serta waktu tunak 2% dari respons langkah sistem.

Daftar Pustaka

- IEEE-SA Standards Board. 2016. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies." *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, 1–207.
- Mason, Samuel J. 1956. "Feedback Theory - Further Properties of Signal Flow Graphs." In *Proceedings of the IRE*, 920–26.
- MathWorks. 2024. "PID Tuner." <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>.
- Nise, Norman. 2015. *Control Systems Engineering*. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering*. 5th ed. Boston, MA: Prentice Hall.
- Oppenheim, Alan V., Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab. 1997. *Signals & Systems*. New Jersey: Prentice Hall.
- Saadat, Hadi. 2010. *Power System Analysis*. 3rd ed. New York, NY: PSA Publishing LLC.
- Tay, T. T., I. M. Y. Mareels, and J. B. Moore. 1997. *High Performance Control*. Basel: Birkhäuser.